

土木学会 エネルギー委員会主催 シンポジウム



放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム

Comprehensive Symposium on Latest Trends on Radioactive Waste Disposal Technology

(2022年5月17日 (火) 、10:00~17:00; 土木学会講堂)

主催：土木学会 エネルギー委員会

(担当：低レベル放射性廃棄物・汚染廃棄物対策に関する研究小委員会)

プログラム

10:00～10:05 開会挨拶

10:05～12:00【講演-1】

- 1)「低レベル放射性廃棄物埋設事業の取組み状況」 (佐々木泰:日本原燃)
- 2)「地下空洞型処分施設に係る技術開発について」 (藤原啓司:原子力環境整備促進・資金管理センター)
- 3)「研究施設等廃棄物処分の基本的な考え方と処分技術の開発状況」(坂井章浩:日本原子力研究開発機構)

12:00～13:00 【休憩(昼食)】

13:00～14:50【講演-2】

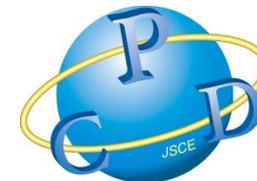
- 4)「TRU廃棄物の地層処分におけるガス発生の影響に関する研究開発」
(藤井直樹:原子力環境整備促進・資金管理センター)
- 5)「放射性廃棄物地層処分における長期の地下水動態評価に係る地下水年代測定技術の最近の進展」
(中田弘太郎:電力中央研究所)
- 6)“Numerical assessment of a hybrid approach for simulating three-dimensional flow and advective transport in fractured rocks” (Prof. Chuen-Fa Ni, National Central University of Taiwan) (倪春發:台湾国立中央大学)

14:50～15:00【休憩(10分)】

15:00～16:55【講演-3】

- 7)NUMOにおける地質環境のモデル化技術の高度化に向けた取組み状況
(尾上博則:原子力発電環境整備機構)
- 8)「幌延地下研における立坑掘削時の水圧応答と亀裂連結性の変化等に関する研究開発」
(尾崎裕介:日本原子力研究開発機構):
- 9)「亀裂性媒体の地下水流動・核種移行解析における不確実性」
(内田雅大:Fracture Flow Solutions代表/元、日本原子力研究開発機構)

16:55～17:00【閉会挨拶】



Comprehensive Symposium on Latest Trends on Radioactive Waste Disposal Technology

Organized by the Energy Committee
of the Japan Society of Civil Engineers (JSCE)

May 17th (Tue.) 、 10:00~17:00; JSCE Auditorium)

Organizer: **Energy Committee , JSCE**
(In charge: Research Subcommittee on Countermeasures for Low-
Level Radioactive Waste and Contaminated Waste)

Program of Symposium

10:00~10:05 開会挨拶

10:05~12:00 【Lecture Group-1】

1) “Current status of LLW buried disposal business and efforts to advance technology by JNFL”

(Dr. Tai Sasaki : JNFL)

2) “RWMC’s R&D for intermediate depth disposal”

(Mr. Hiroshi Fujihara: RWMC)

3) “Basic concept of disposal facility and development status of disposal technology for wastes from research facilities, etc.”

(Dr. Akihiro Sakai : JAEA)

12:00~13:00 【Break】

13:00~14:50 【Lecture Group-2】

4) ”R&D on influences of gas generation on geological disposal of TRU waste“ (Mr. Naoki Fujii : RWMC)

5) “Recent developments in groundwater dating technology for long-term groundwater dynamics evaluation in geological disposal of radioactive waste”

(Dr. Kotaro Nakata : CRIEPI)

6) “Numerical assessment of a hybrid approach for simulating three-dimensional flow and advective transport in fractured rocks”

(Prof. Chuen-Fa Ni, National Central University of Taiwan)

14:50~15:00 【Short break】

15:00~16:55 【Lecture Group-3】

7) “Current status of NUMO’s efforts to advance geological environment modeling technology”

(Dr. Hironori Onoe : NUMO)

8) “R&D on changes in hydraulic response, crack connectivity during shaft excavation at Horonobe URL”

(Dr. Yusuke Ozaki : JAEA):

9) “Uncertainty in flow and mass transport modelling of fractured media”

(Dr. Masahiro Uchida: Fracture Flow Solutions / Former, JAEA)

16:55~17:00 【Closing remarks】

Current status of LLW buried disposal business and efforts to advance technology

May 17, 2022

Tai Sasaki

Japan Nuclear Fuel Limited

Preface



- JNFL's Low-Level Radioactive Waste Burial Center has been in operation since 1992, and the No. 2 Waste Burial Facility since 2000.
- Approximately 330,000 drums of waste have already been buried.
- In August 2018, the company applied for a business change permit for the expansion of the No. 3 waste burial facility and received the permit on July 21, 2021.
- The review is based on the "Regulations Concerning Standards for Location, Structure and Equipment of Class II Landfill Facilities enacted in 2013 (partially amended in December 2019) by NRA(Nuclear Regulation Authority).
- This section provides an overview of the facility and its design.

Progress of LLW disposal business



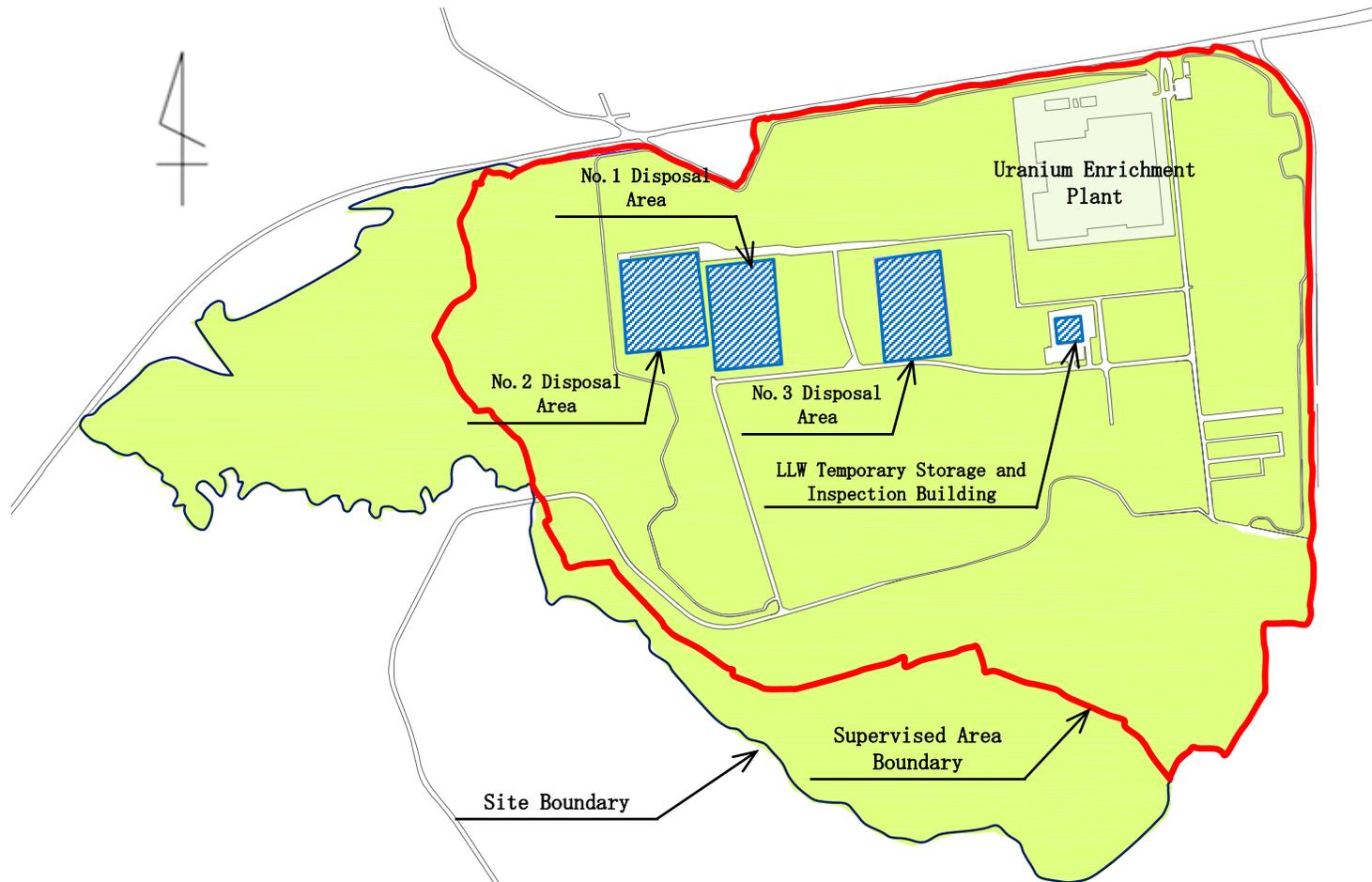
- 1984 July FEPC(The Federation of Electric Power Companies of Japan) chairman asked the Aomori Governor and the Rokkasho Mayor for establishment of three nuclear fuel cycle facilities.
- 1985 Apr. The Governor and the Mayor accepted the FEPC's proposal.
- 1985 July Establishment of JNFI (the former company of JNFL)
- 1988 Apr. Application for business permission
(for construction & operation of No.1 disposal facility)
- 1990 Nov. Its approval & start-up of construction of the Rokkasho LLW Disposal Center
- 1992 July Merger between JNFS and JNFI (precursors of JNFL), Establishment of JNFL
- 1992 Dec. Start-up of The Rokkasho LLW Disposal Center (No.1 disposal facility)
- 1997 Jan. Application for the change of business
(for construction & operation of No.2 disposal facility)
- 2000 Oct. Its approval & start-up of the No.2 disposal facility
- 2013 Dec. NRA establish "Standards for the Location, Structure, and Equipment of Category 2 Waste Disposal Facility"
NRA :The new regulatory body, reorganized after the Fukushima-Daiichi Accident
- 2018 Aug. Application for the change of business
(for construction & operation of No.3 disposal facility)
- 2021 July Its approval & start-up of the No.3 disposal facility

Classification of radioactive waste

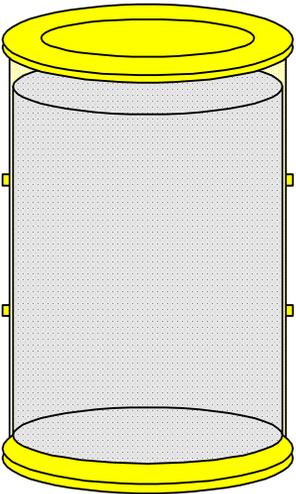
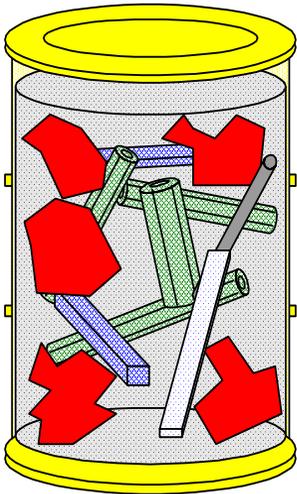
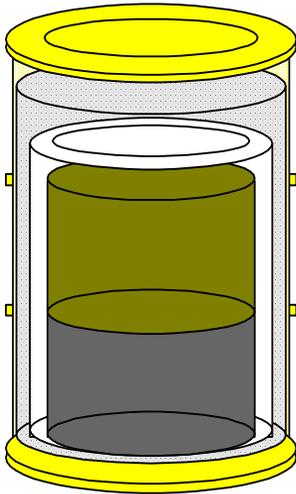


| Type of waste | | Example of waste | Disposal method | | |
|---|------------------------------|---|--|---|--|
| Waste from Nuclear Fuel Cycle Facilities | Waste from NPPs | Waste below clearance level (treatable as non-radioactive material) | Most waste from decommissioning NPPs, etc. | Recycling/disposal as non-radioactive material | |
| | | LLW | Very low-level radioactive waste (L3) | Concrete, metal, etc. | Trench disposal Near-surface disposal without engineered barriers |
| | | | Relatively low-level radioactive waste (L2) | Solidified liquid waste, spent equipment, consumables, etc. | Disposal at concrete vault Near-surface disposal with engineered barriers |
| | | | Relatively high – level radioactive waste (L1) | Control rod, Core-internals, Solidified liquid waste, etc. | Intermediate depth (over 70m) disposal with engineered barriers |
| | | Relatively much volume of long half-lifetime nuclides | Solidified fuel assembly parts, etc. | Geological disposal (over 300m) | |
| | High-level radioactive waste | Vitrified waste | | | |

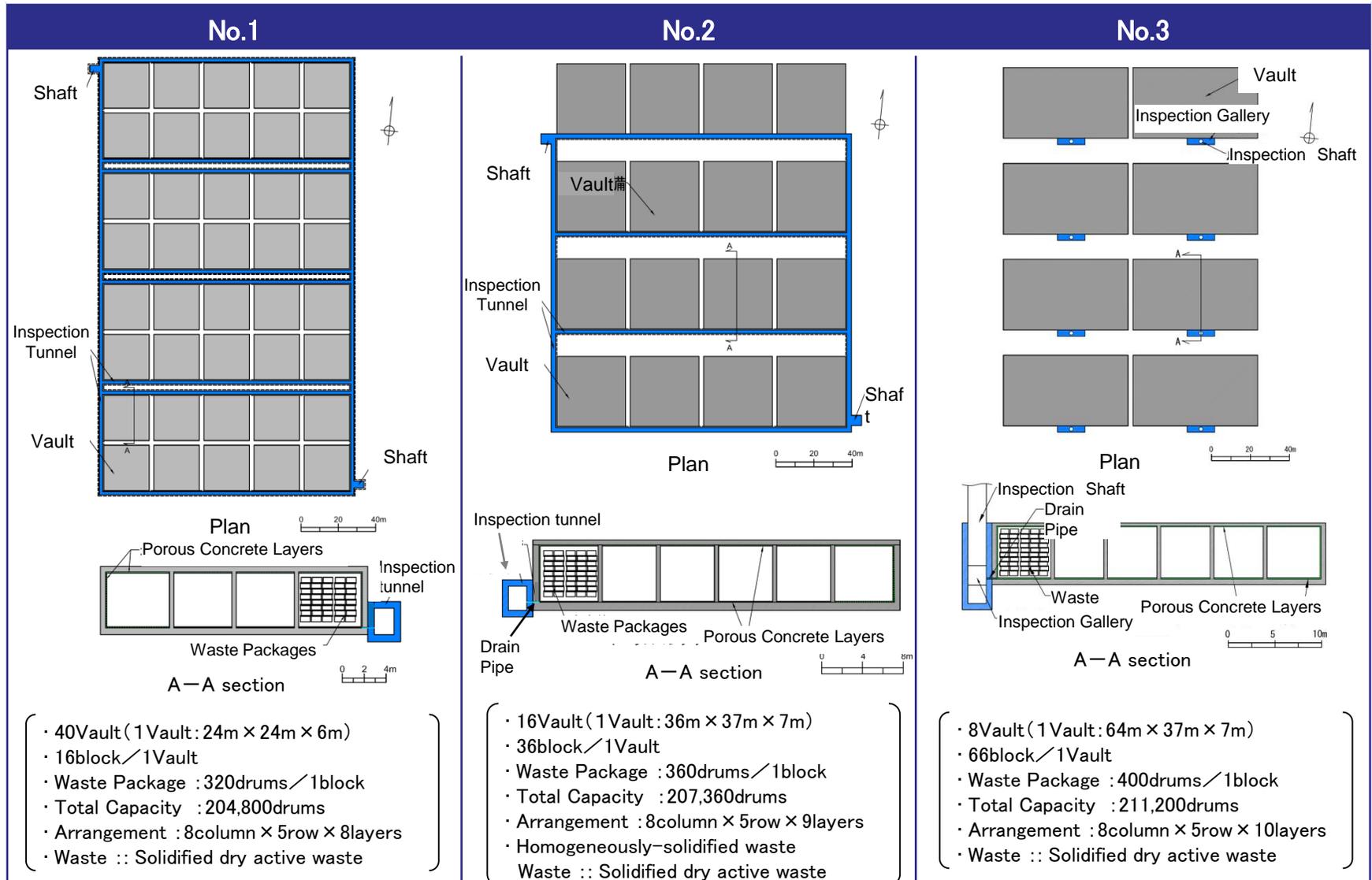
Rokkasho LLW Disposal Center



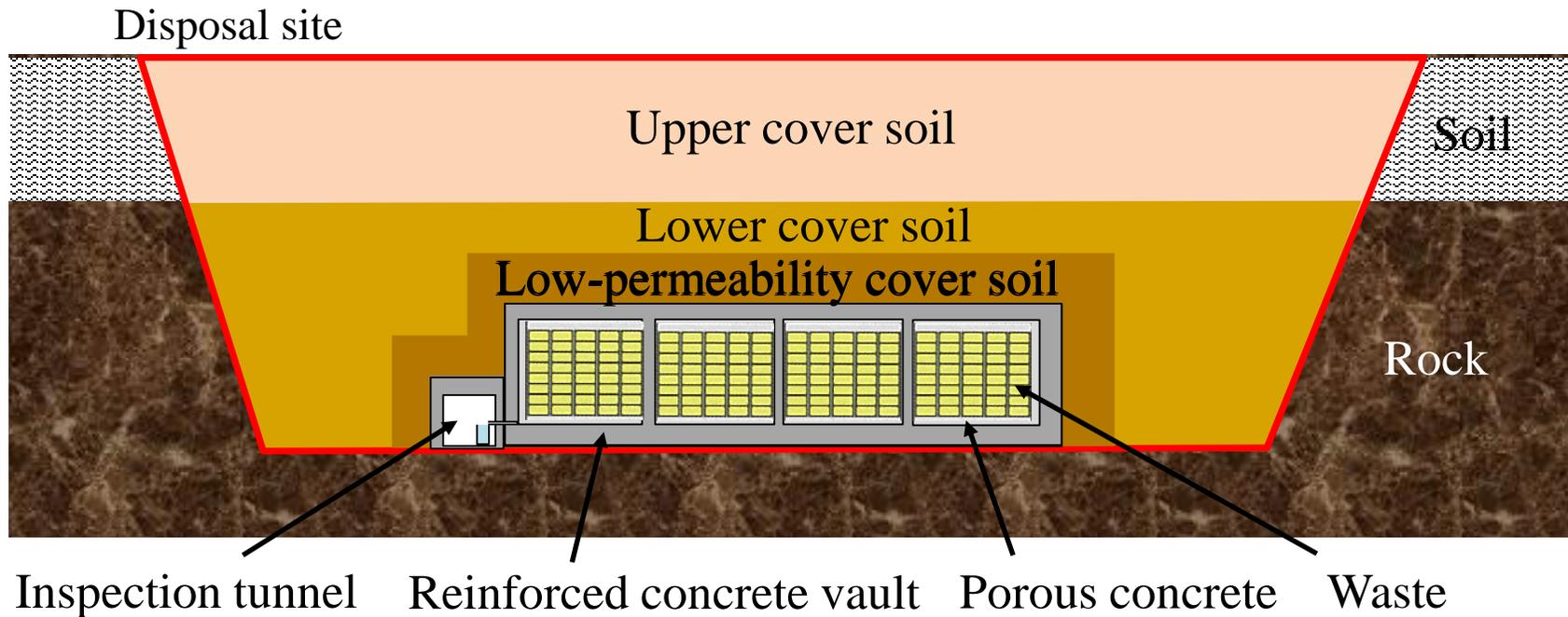
Waste

| Facility | No.1 | No.1、No.2、No.3 | |
|------------------------|--|--|--|
| Type of waste | Homogeneously-solidified waste | Solidified dry active waste | |
| | | Encapsulated waste package | Melting-solidified waste package |
| Image of waste package |  |  |  |
| Target waste | Condensed liquid spent resin, etc. | Dry active waste | Dry active waste |
| Solidified material | Cement, asphalt or plastic | Mortar | Mortar |

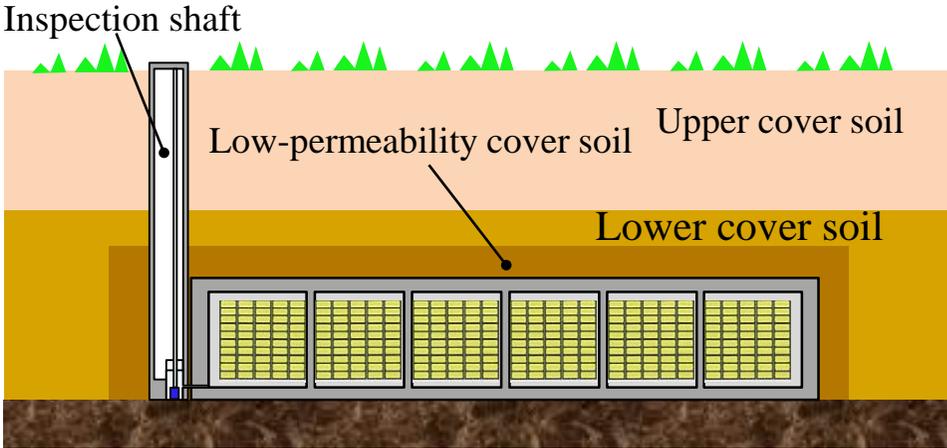
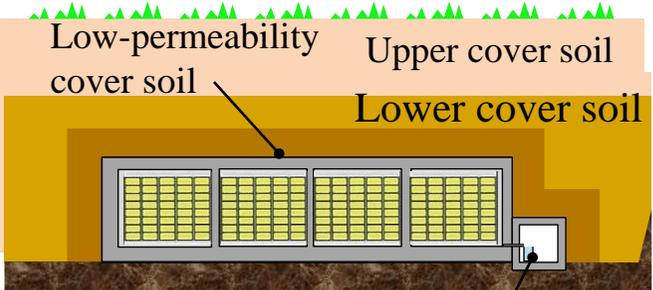
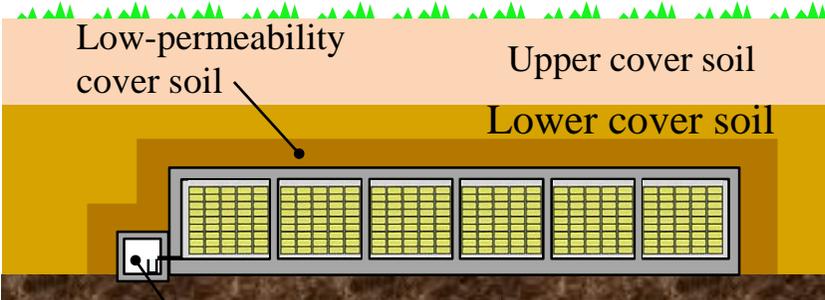
Outline of Disposal Facility



Disposal Facility (Rokkasho No.1)

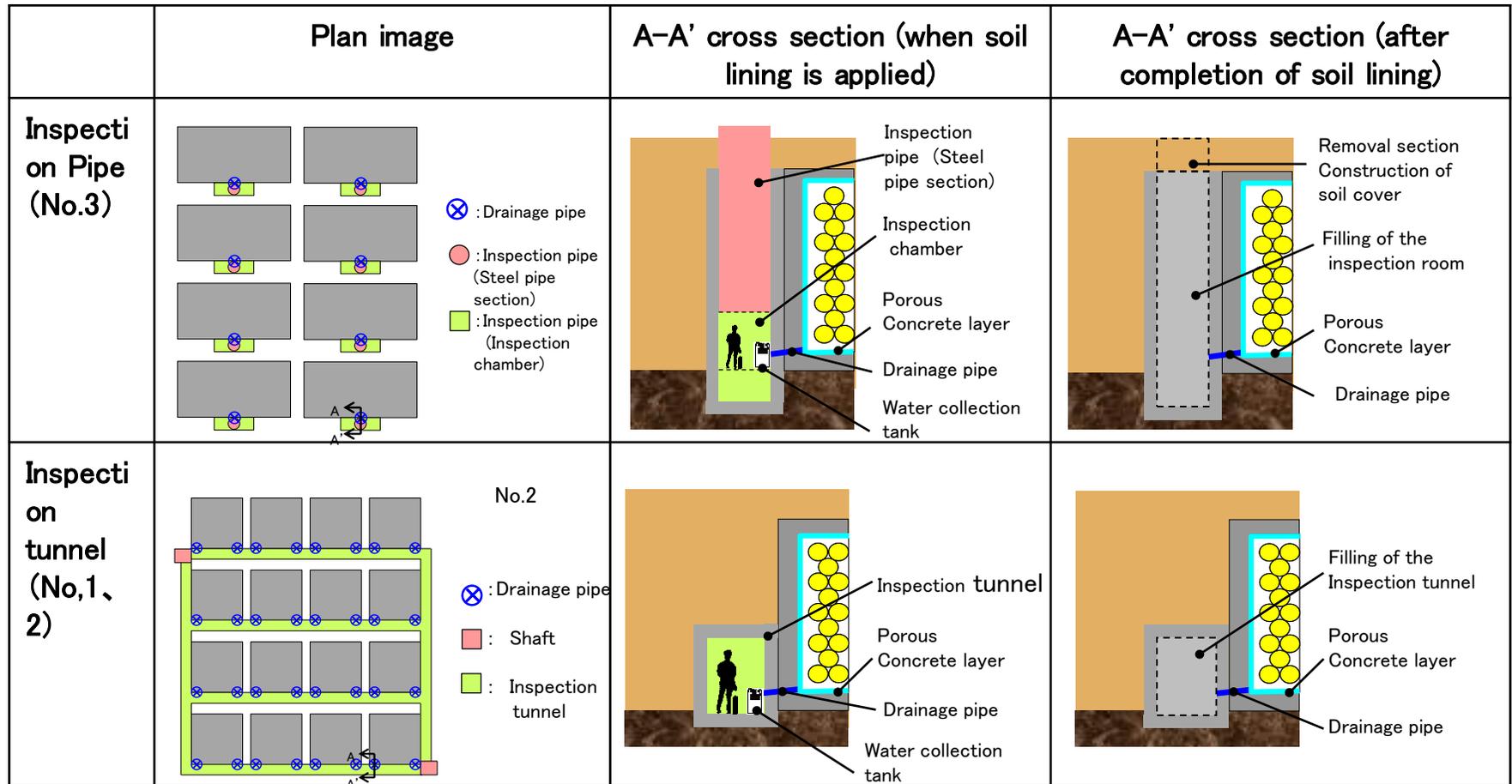


Cover Soil

| No.3 | specification |
|--|--|
|  <p>Inspection shaft</p> <p>Low-permeability cover soil</p> <p>Upper cover soil</p> <p>Lower cover soil</p> | <p><u>Low-permeability cover soil</u></p> <ul style="list-style-type: none">• bentonite sand mixture• 2m <p><u>Lower cover soil</u></p> <ul style="list-style-type: none">• locally-produced soil & clay• 2m <p><u>Upper cover soil</u></p> <ul style="list-style-type: none">• locally-produced soil• To grand surface |
| No,1 | No.2 |
|  <p>Low-permeability cover soil</p> <p>Upper cover soil</p> <p>Lower cover soil</p> <p>Inspection tunnel</p> |  <p>Low-permeability cover soil</p> <p>Upper cover soil</p> <p>Lower cover soil</p> <p>Inspection tunnel</p> |

Drainage monitoring system

The waste packages should be installed in such a way that water entering the burial facility can be drained and collected during the period between the start of acceptance of the radioactive waste to be buried and the completion of the soil covering.



Operation and Control Stage

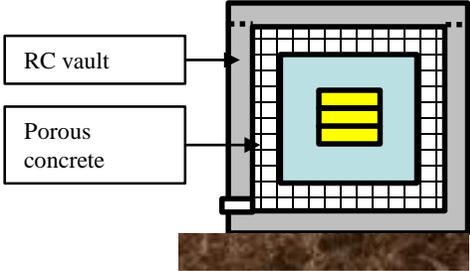
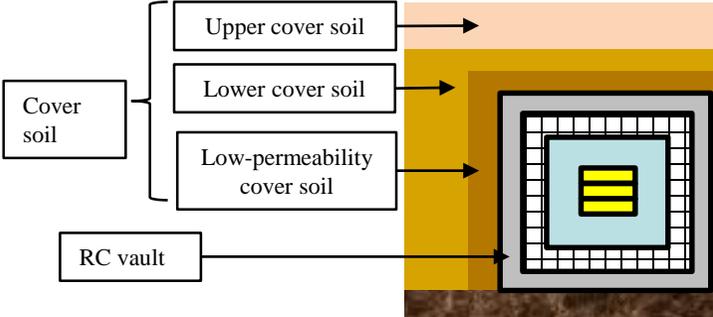


Completion of soil covering ▽

Start of decommissioning Phase ▽

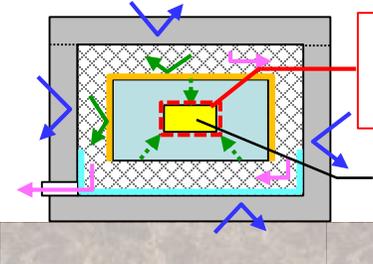
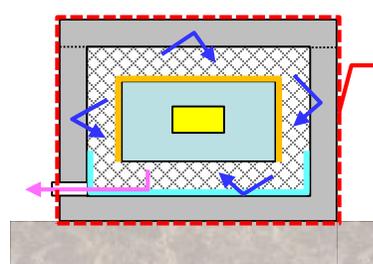
| Phase | Start of acceptance~ Completion of soil covering | Completion of soil covering~decommissioning Phase |
|--------------------|---|--|
| time | 27 years after the start of burial (In case of No. 3) | 300 years after completion of covering |
| Concept | Prevention of leakage by burial facilities, etc. | Migration control by burial facilities and surrounding soil, etc. |
| Management details | <ul style="list-style-type: none"> Establishment of burial preservation area, installation of tags at the burial site / Patrol and inspection of the burial site, repair of buried facilities and soil cover, etc. Restoration of buried facilities and soil cover, etc. / Environmental monitoring Periodic evaluation, etc., and monitoring of groundwater conditions related to the functions of engineered and natural barriers necessary for such evaluation, etc. Monitoring of groundwater conditions related to the function of engineered barriers and natural barriers necessary for periodic evaluations, etc. | |
| | <ul style="list-style-type: none"> Establishment of a perimeter monitoring zone Monitoring of radiation dose and concentration of radioactive materials in groundwater in the vicinity of the boundary of the monitoring area Prohibit the use of stream water, restrict excavation, and prohibit habitation. | |
| | <ul style="list-style-type: none"> Drainage by drainage/monitoring facilities Monitoring of no leakage (drainage/monitoring facilities) | <ul style="list-style-type: none"> Monitoring of leakage (near buried site, near site boundary) |

Safety Features and Structure of Disposal Facility

| Safety functions | Before closure | |
|------------------------------|---|---|
| | Period until covering soil | Period after covering soil |
| Containment | ○ (RC vault and porous concrete layer) | — |
| Migration retardation | — | ○ (RC vault and cover soils) |
| Shielding | ○ (RC vault) | ○ (Cover soils) |
| Conceptual diagram |  |  |

<Remarks> ○: functions are expected, —: functions are not expected, (): elements providing functions

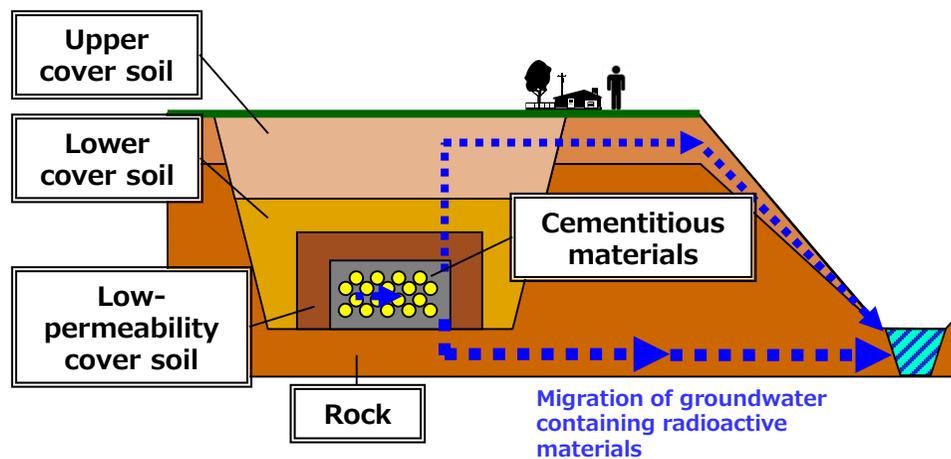
Design of Containment

| Elements | Legend | | Expected safety functions | | | |
|---------------------------------|---|---|---|---|--|----------------------------------|
| | Part | Water movement | Prevention of water infiltration | | Prevention of radionuclide leakage | |
| Reinforced concrete |  |  | ○ | Preventing water infiltration through vault | ○ | Preventing leakage through vault |
| Internal waterproof (bottom) |  |  | ○ | | | |
| Porous concrete |  |  | ○ | Draining infiltrated water | ○ | Collecting contaminated water |
| Filing mortar |  |  | ○ | Preventing contact between waste and water | — | |
| Internal waterproof (top, side) |  |  | ○ | | — | |
| Conceptual diagram | | |  | |  | |

Migration Control Function

Design Concept of Migration Control Functions

| Part | Expected function | |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | Low-permeability* ¹ | Adsorption * ² |
| Upper cover soil | — | ○ |
| Lower cover soil | ○ | — |
| Low-permeability cover soil | ○ | ○ |
| Rock | ○ | ○ |
| Cementitious materials | — | ○ |



*1 : Low permeability reduces groundwater inflow to buried facilities

*2 : Delays the migration of radioactive materials due to sorption properties

Mortar filling test



Mock-up facility

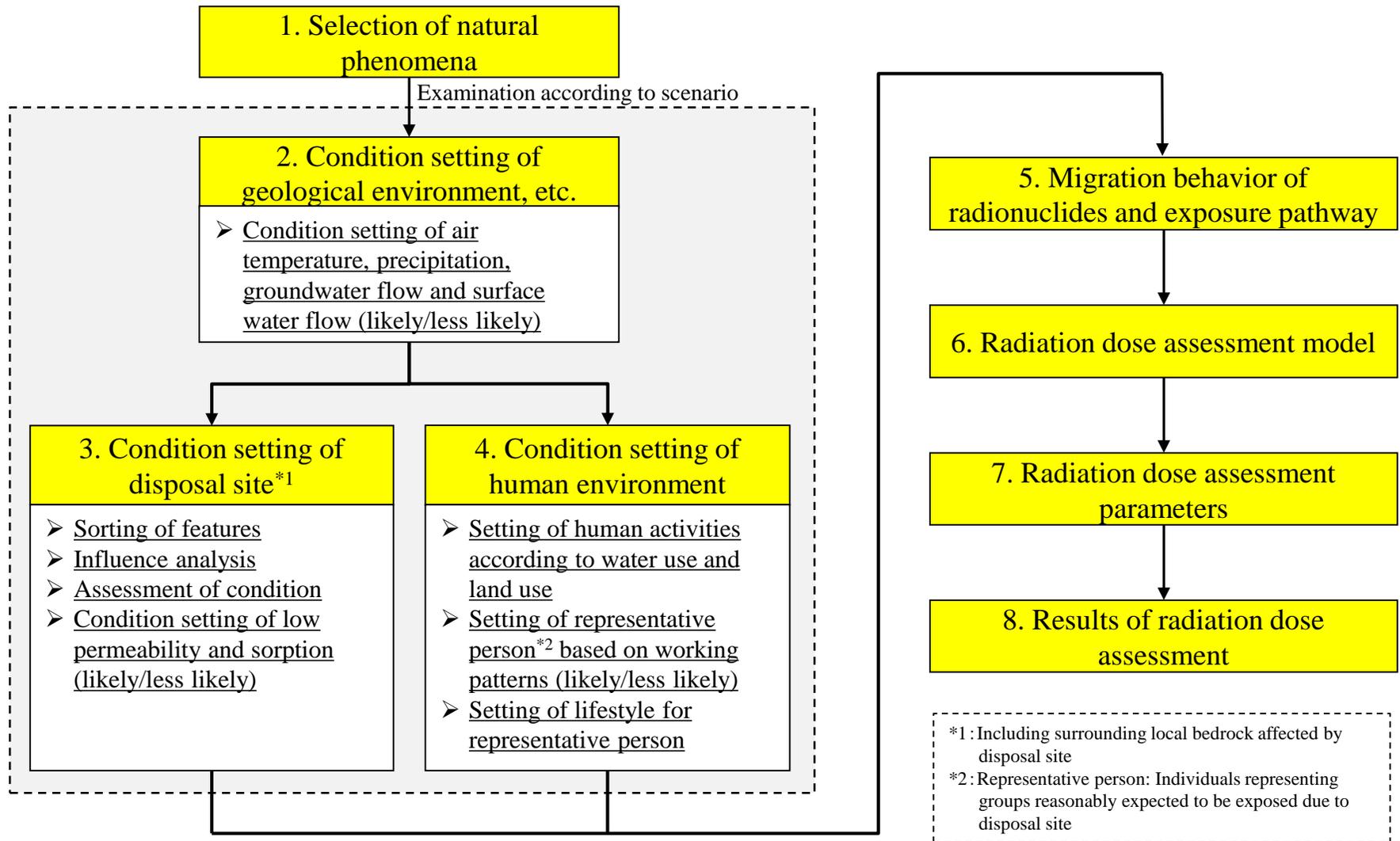
| W/B (%) | S/B | Air (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | | |
|---------|------|---------|----------------------------------|----------------------|---------------------------------|-----------|------------------|-----------|--------------------------------------|-------------------------------|
| | | | water W | Bonding material B | | | Fine aggregate S | | Non-separable mixing agents in water | Super AE water reducer SP8HVM |
| | | | | Moderate-heat cement | Blast furnace slag Micro powder | expansion | sand | Land sand | | |
| 55.0 | 3.17 | 5.0 | 252 | 458 | | | 1,454 | | 1.1 | 4.58 B ×1.0 % |
| | | | | 131 | 307 | 20 | 872 | 582 | | |

Mortar Composition

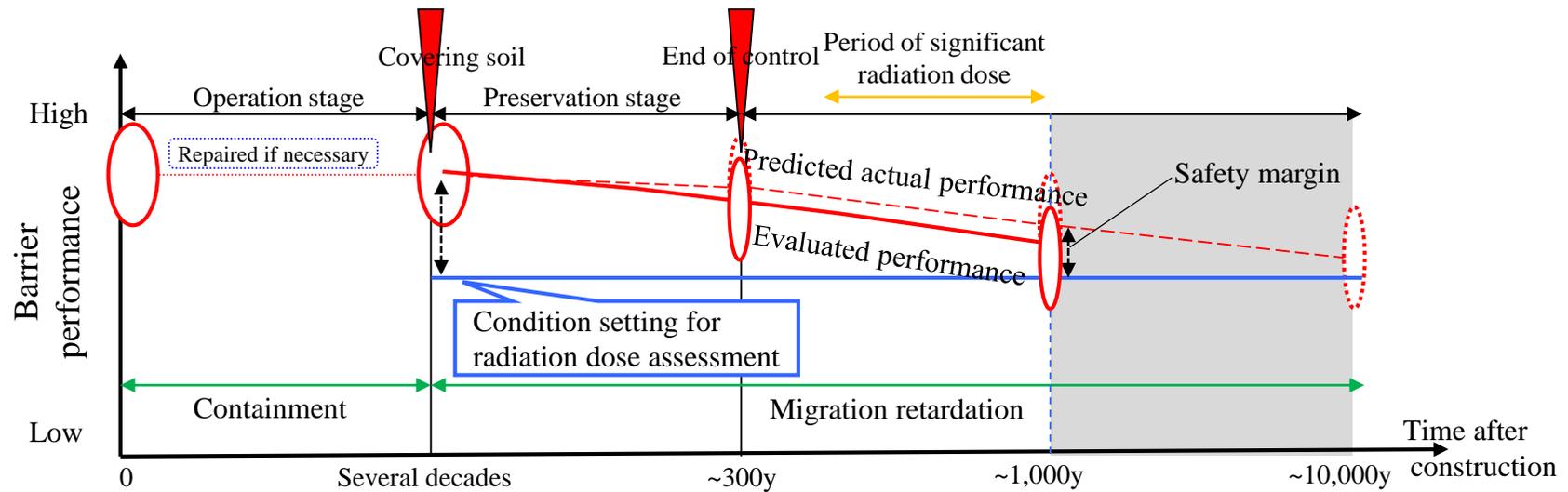
Mortar Filling Test



Safety assessment flow after control period



Conceptual diagram of changes in barrier performance over time in radiation dose assessment



Selection of Natural Phenomena

The phenomena that may affect the condition of waste disposal sites and living environment are comprehensively selected with reference to national and international standards and documents



Natural phenomena that should be considered in setting the long-term conditions were selected (15 events).

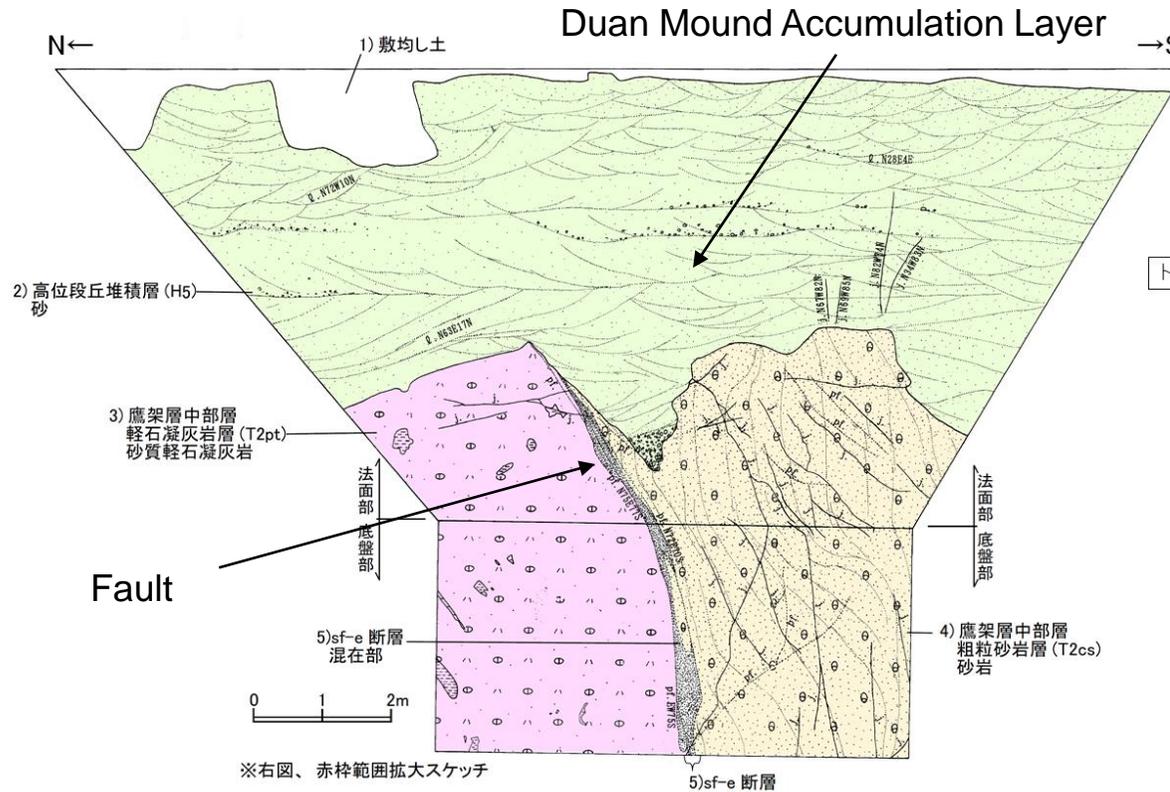
| Event of origin | Long-term event | Item |
|---|-------------------------------|---|
| Event caused by plate motion | Volcanic and igneous activity | (1) Volcanic effects (pyroclastic density flow, falling pyroclastic material) |
| | Earthquake/faulting activity | (2) Earthquakes, (3) Liquefaction, (4) Fault activities (ground deformation) |
| | Uplift/subsidence movement | (5) Uplift/sedimentation |
| Climate change-induced events | | (6) sea level change, (7) temperature, (8) precipitation, (9) Amount of irrigation |
| Events caused by both plate motion and climate change | | (10) Erosion, (11) Groundwater level, (12) Evapotranspiration, (13) River discharge |
| Other phenomena | | (14) Biological events, (15) Changes in permeability |



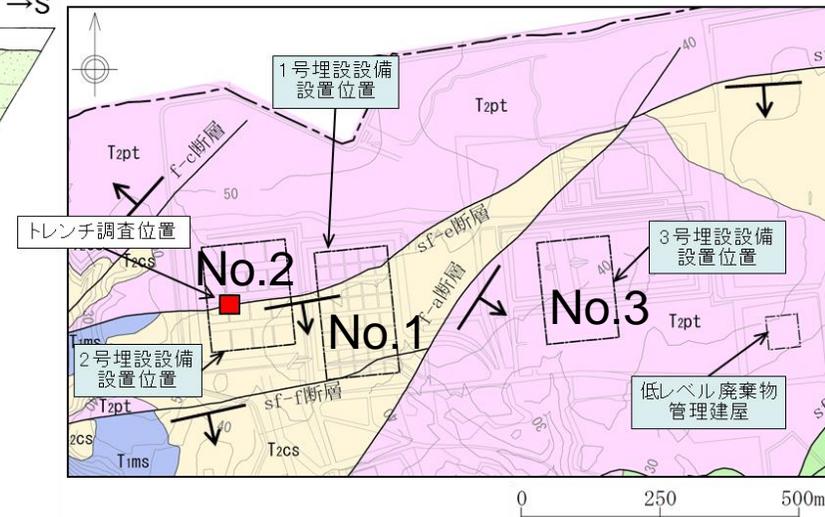
Events that have a direct impact on dose assessment parameters after considering the above events individually

⇒ ① Temperature and precipitation changes, ② groundwater flow, ③ evapotranspiration and ④ surface water flow

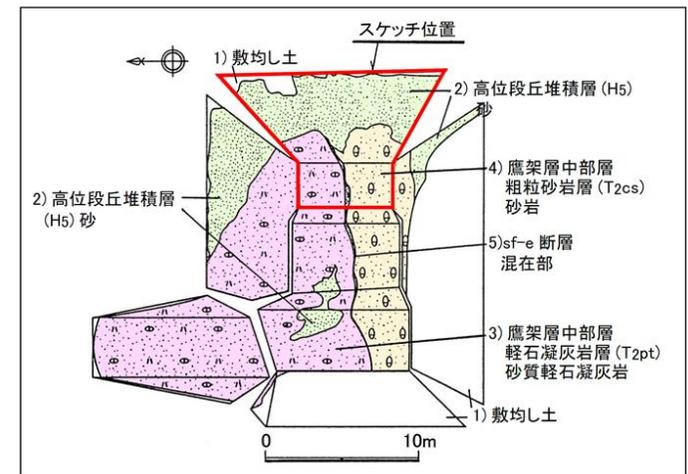
Fault



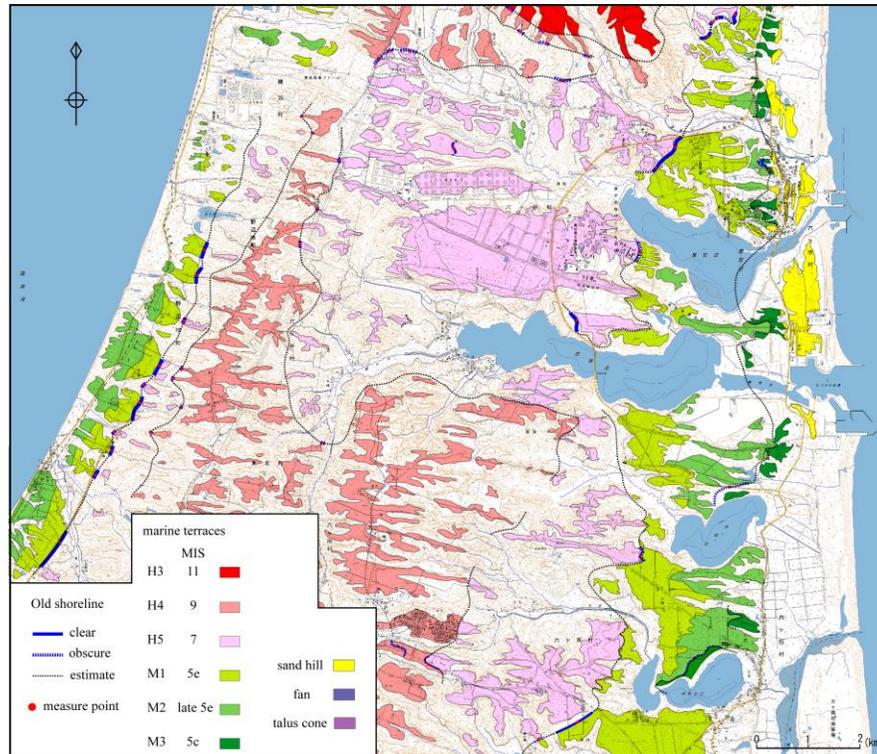
- | | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| 1) 敷均し土 | : 造成に伴う敷均し土からなる。 | ℓ: 葉理 |
| 2) 高位段丘堆積層 (H5) 砂 | : 黄褐色～灰褐色を呈する中～粗粒砂からなる。所々に安山岩、チャートの亜角～亜円礫 (径 0.5cm ~ 10cm) を含む。葉理がみられる。 | j: 節理 |
| 3) 鷹架層中部層 軽石凝灰岩層 (T2pt) 砂質軽石凝灰岩 | : 塊状の灰白～黄灰色を呈する砂質軽石凝灰岩からなる。軽石片 (径 0.2cm ~ 2cm) を多く含み、一部に泥岩礫を含む。 | pf: 断層 (ゆ着した断層) |
| 4) 鷹架層中部層 粗粒砂岩層 (T2cs) 砂岩 | : 暗黄灰色を呈する中粒～粗粒砂岩からなる。軽石片 (径 0.2cm 前後) や貝化石片を含み、葉理が発達する。 | |
| 5) sf-e 断層 混在部 | : 砂岩、砂質軽石凝灰岩等が混在した部分 (混在部) からなる。周囲の岩石に比べてやや硬質である。 | |



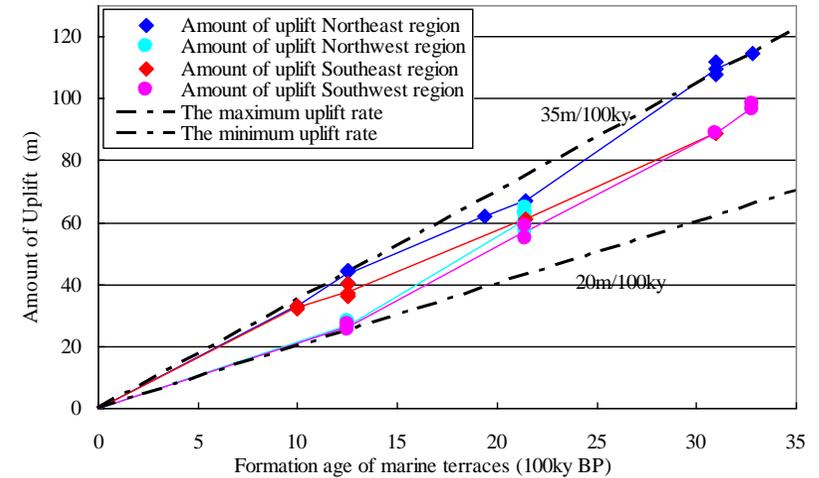
トレンチ調査位置図



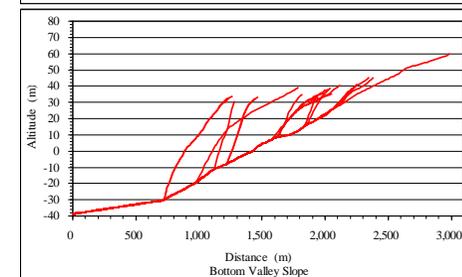
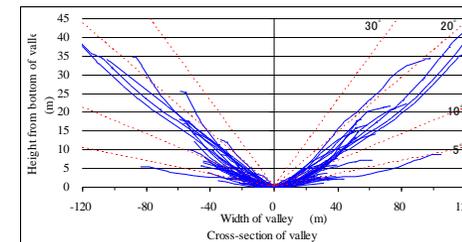
Topographic Change



Classification of terraces



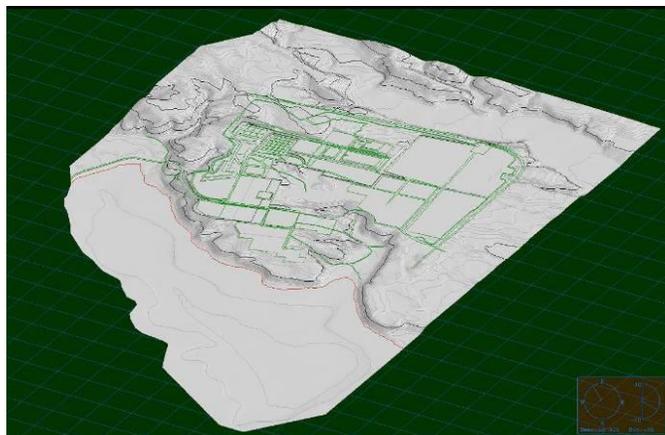
Uplift rate during last 400,000 years



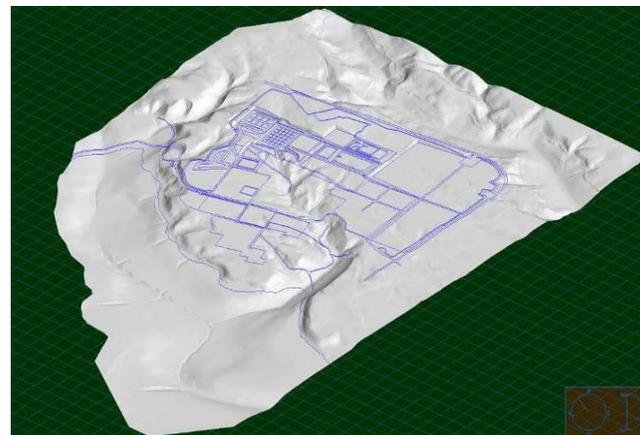
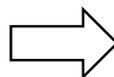
Similarities of along and across river cross sections for research area

Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste , NEA 2009

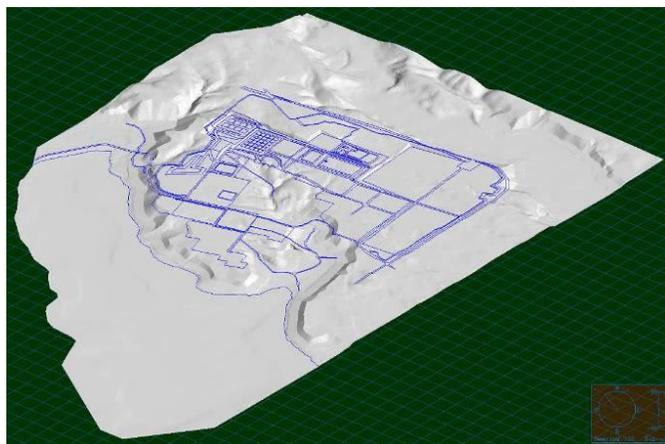
Bird's eye view of topographic model



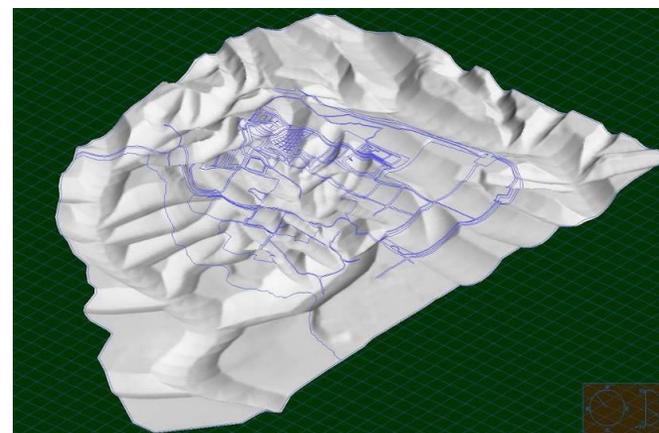
(present)



(Cooling climate case: after about 10,000 years)

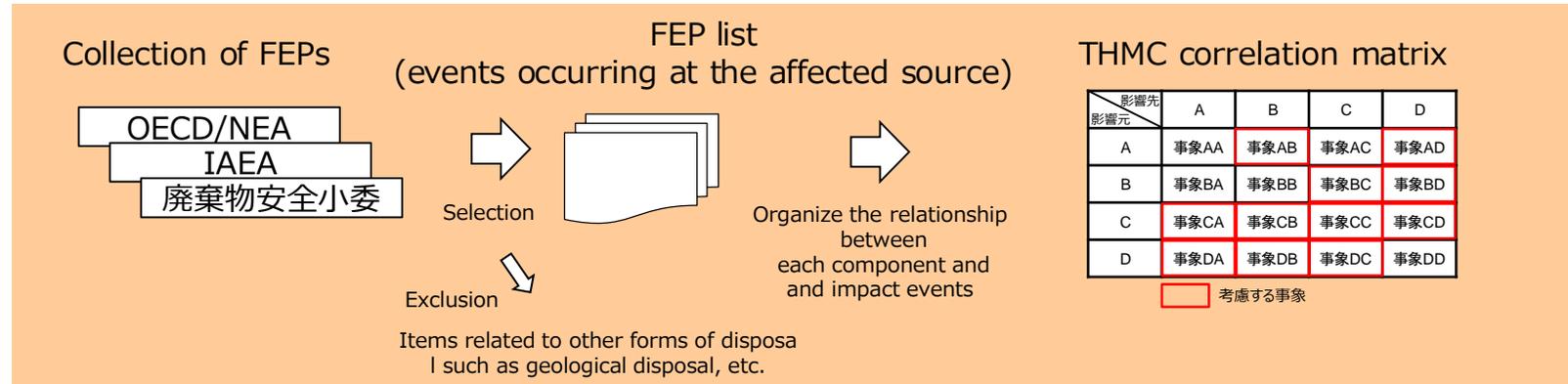


(warming climate case)



(Cooling climate case: after about 60,000 years)

State Setting (Impact Event Analysis)



Extraction results from THMC matrix analysis (1/2)

| Term | Major impact event | Migration Control Functions | Impact | Impact Assessment Results |
|-----------|--------------------|-----------------------------|--------|---|
| Heat | Decay heat | Low permeability Sorption | — | The amount of radioactive materials contained in the waste package to be buried is small, and the temperature is sufficiently lower than the temperature at which thermal transformation of each component occurs. |
| | Heat of hydration | Low permeability Sorption | — | The sorption of cementitious materials is not considered as an impact event, since the sorption is expected to occur after hydration. |
| | Temperature change | Low permeability Sorption | — | The temperature does not increase to the extent that thermal alteration occurs. The buried facilities after the completion of soil lining will be installed at a depth of about 20 m below the ground surface, which means that the temperature will not increase to the extent that thermal alteration will occur. |
| hydraulic | Groundwater Flow | Low permeability | ○ | Groundwater flow velocities in the vicinity of the waste burial site (bedrock and Quaternary layers) are sufficiently low to have an impermeable However, it is considered in "C (Chemistry) Reaction with groundwater". |
| | | Sorption | ○ | The groundwater flow velocity in the vicinity of the waste burial site (bedrock and Quaternary layers) is sufficiently low to have no direct effect on the impermeable However, it is considered in "C (Chemistry) Reaction with groundwater". |

State Setting (Impact Event Analysis)



Extraction results from THMC matrix analysis (2/2)

| Term | Major impact event | Migration Control Functions | Impact | Impact Assessment Results |
|-----------|---|-----------------------------|--------|---|
| Mechanics | Expansion(metal corrosion, effect of salt) | Low permeability | ○ | Areas of altered permeability due to reduction in thickness and displacement may occur at the corners and other areas of impermeable soil cover. |
| | Gas generation | Low permeability | — | The results of permeability and permeability tests showed that there was almost no change in hydraulic conductivity of soil before and after gas breakthrough. |
| | Swelling pressure of bentonite | Low permeability | — | Swelling pressure of bentonite is not considered as an impact event because it is small compared to the surrounding ground pressure. |
| | Seismic | Low permeability | — | Mechanical deformation is very small compared to deformation of buried facilities due to metal corrosion. The design of the site is such that liquefaction is not likely to occur easily. |
| Chemistry | Reaction with groundwater | Low permeability Sorption | ○ | Dissolution of montmorillonite and calcium silicate hydrate and formation of secondary minerals may affect the low permeability of the impermeable soil cover, as well as the sorption of each barrier. |
| | Organic matter effect | Sorption | ○ | Cellulose decomposes under alkaline conditions and forms isosaccharinic acid, which forms complexes with radioactive materials. isosaccharinic acid, may affect the sorption properties of each component. |
| | Salt Effects | Low permeability Sorption | ○ | Dissolution of soluble salts in homogeneous and homogenous solidified products into groundwater causes changes in porewater quality. changes in the porewater quality. In addition, the reaction of each component with salt-dissolved porewater may lead to mineral dissolution and secondary mineral formation, resulting in alteration of the components. |
| | Colloidal effects | Sorption | — | The pore water of buried facilities is cement equilibrium water and is not an environment in which colloids can be dispersed stably. |
| | Microbial Effects | Sorption | ○ | Organic matter is mineralized by microorganisms in bedrock , and this should be taken into account when setting sorption potential. |
| | pyroclastic precipitate | Low permeability Sorption | — | The upper layer of the soil cover is thick enough to limit the extent of chemical influence (buffering effect) to the surface layer. |

Mechanical Effects of Soil Cover

Evaluate the effect of soil cover on hydraulic conductivity using the DEM.

→ Based on the results of the evaluation, it is assumed that the hydraulic conductivity of the soil cover will not change, but the thickness of the soil cover will change in the mechanical impact.

| Phenomena | Type of waste | facility | Concept of phenomena |
|-----------|--------------------------------|------------|---|
| expansion | Solidified dry active waste | No.2, No.3 | Assume that expansion occurs due to the metals corrode |
| | | No.1 | Assume that expansion occurs due to the reaction of soluble salts with cementitious materials |
| sink | Homogeneously-solidified waste | No.1 | Assume that the leaching of soluble salt will create cavities in buried facilities and cause the cover to cave in |

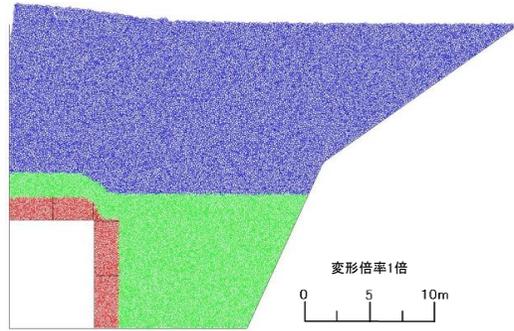
Mechanical Effects of Soil Cover



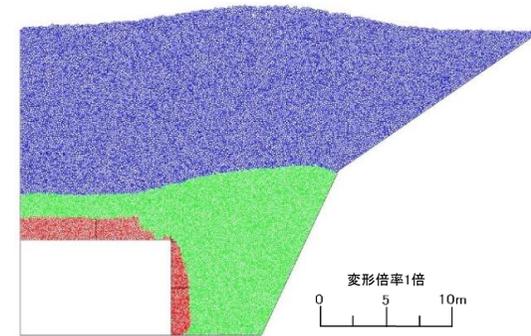
○ Approach to Setting Conditions for Assessment of Condition Changes (Mechanical Effects) after 1,000 Years

| Item | Setting | | Concept of setting |
|----------------------|----------------------|-------------------------------------|---|
| Metal corrosion rate | Less-likely scenario | Assume all metals corrode instantly | Uncertainties related to localized corrosion (pitting corrosion), dissimilar metal contact corrosion and changes in environmental conditions should be considered. During the evaluation period of condition change after the start of decommissioning (after 1,000 years), it is assumed that the entire amount of corrosion, regardless of the corrosion type, will be instantaneous. The total amount of corrosion is assumed to be instantaneous, regardless of the corrosion type. |
| | Likely scenario | 0.1 μ m/y | consider measurement errors inherent in corrosion rate measurement methods |
| Expansion factor | Less-likely scenario | 4 times | The set metal types and amorphous hydroxides were set to account for variations in environmental conditions. The contamination rates of the other metal types were evaluated in a range of 0 to 50 %, and the corrosion expansion factor was less than 4 times for all of them. |
| | Likely scenario | 3 times | The corrosion product of the representative metal type (iron) was set as Fe ₃ O ₄ (magnetite), and the mixing ratio of other metal types to be considered was set in the range of 0wt% to 50wt%. The results of the evaluation of the corrosion expansion ratio of the mixed metals were as follows. The results showed that the corrosion expansion factor was less than 3 times in all cases. |

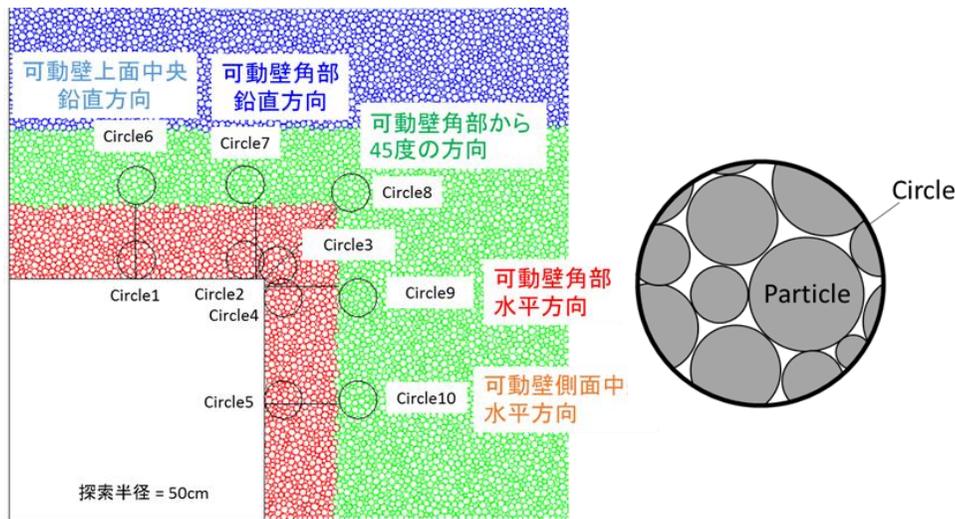
Density change in cover soil due to facility expansion



vertical : 2.0m



horizontal : 5.0m、vertical : 1.0m

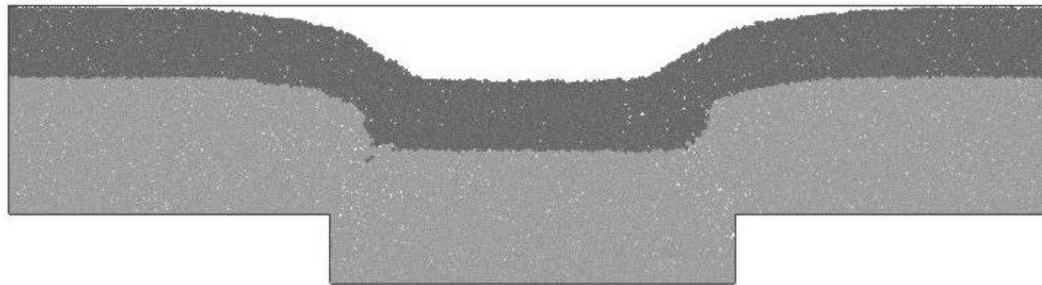
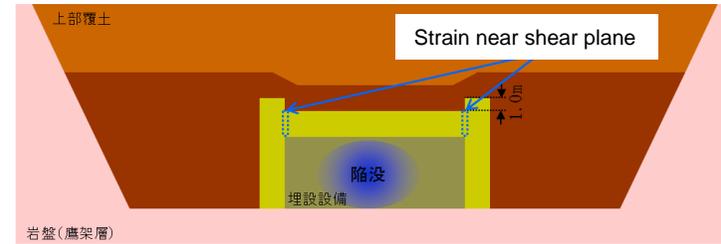
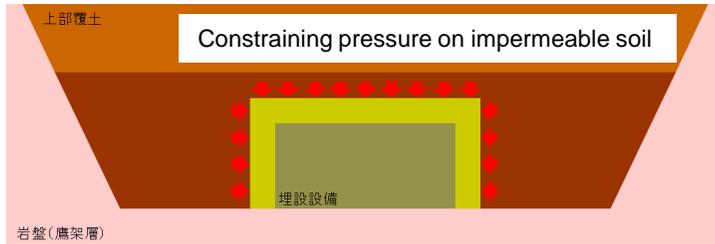


Differential Elemental Method

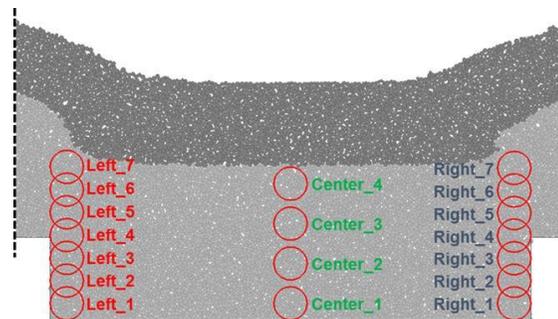
| location | Deformation | |
|----------|------------------------------------|--|
| | Fig 1 vertical :2.0m | Fig 2 horizontal :5.0m、 vertical :1.0m |
| | Density increase (%) ^{*1} | |
| Circle1 | -0.8 | 0.3 |
| Circle2 | -2.0 | 1.7 |
| Circle3 | 12.3 | 12.3 |
| Circle4 | 7.3 | 16.3 |
| Circle5 | 21.8 | 30.9 |
| Circle6 | -0.9 | -1.9 |
| Circle7 | -4.0 | -7.1 |
| Circle8 | 0.9 | 0.0 |
| Circle9 | -4.2 | 5.1 |
| Circle10 | 7.8 | 11.5 |

*1 :negative values indicate a decrease in density

Density change in cover soil due to facility sinking



Analytical result



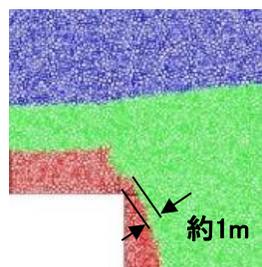
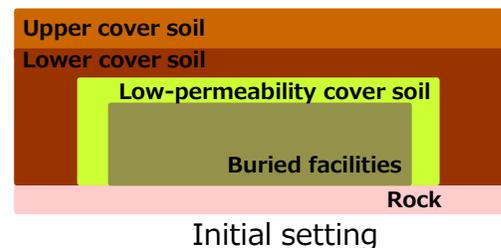
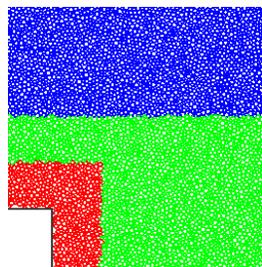
Density change

| 測定位置 | Density increase (%)*1 |
|----------|------------------------|
| Left_1 | 2.4 |
| Left_2 | -2.1 |
| Left_3 | -7.7 |
| Left_4 | -8.2 |
| Left_5 | -4.0 |
| Left_6 | -5.1 |
| Left_7 | -5.2 |
| Center_1 | 8.6 |
| Center_2 | 1.5 |
| Center_3 | 2.6 |
| Center_4 | 2.2 |
| Right_1 | 6.7 |
| Right_2 | -4.4 |
| Right_3 | -2.6 |
| Right_4 | -5.0 |
| Right_5 | -5.5 |
| Right_6 | -1.5 |
| Right_7 | 0.4 |

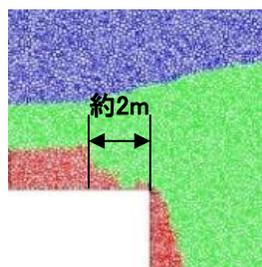
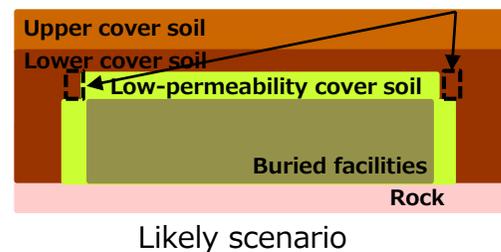
*1*1: negative values indicate a decrease in density

Mechanical Effects of Soil Cover

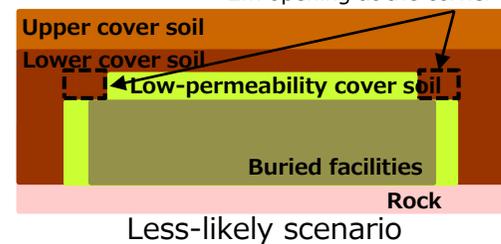
- Evaluation of condition change (mechanical effects) of the soil cover (example of waste burial site No. 3)



No opening occurs at the corner (1m or more remains)



2m opening at the corner



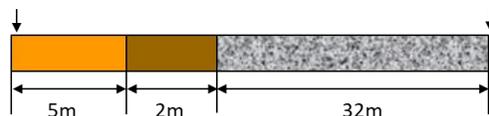
Chemical Effects of Soil Cover

- The composition of groundwater changes due to contact with cementitious materials or soluble salts contained in the waste material buried in the No. 1 waste burial site.
- Highly alkaline groundwater can dissolve or alter the montmorillonite in the bentonite material and, gradually reducing the low permeability function.
- The migration and chemical reactions to impermeable soil cover were evaluated using the PHREEQC-TRANS (coupled chemical reactant migration analysis code).
- Transition of hydraulic conductivity of the impermeable soil lining due to chemical alteration was evaluated.

No.3

Concentration boundary conditions
on the bedrock side
: Fixed by groundwater composition

Concentration boundary condition
on cementitious material side
Fixed at zero flux

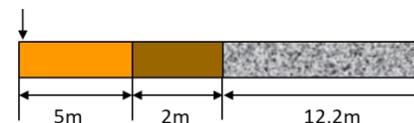


 Lower cover soil & Rock
 Low-permeability cover soil
 Cementitious materials

No.1

Concentration boundary conditions
on the bedrock side
: Fixed by groundwater composition

Concentration boundary condition
on cementitious material side
Fixed at zero flux



 Lower cover soil & Rock
 Low-permeability cover soil
 Cementitious materials

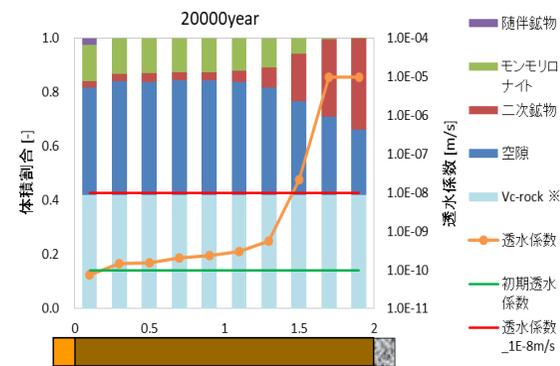
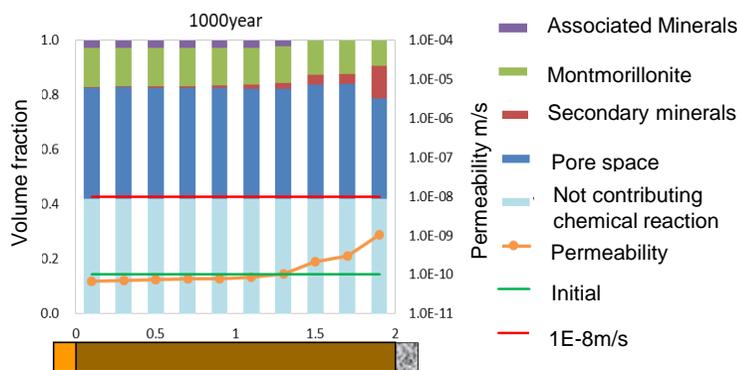
Model & boundary conditions

Chemical Effects of Soil Cover

- Permeability coefficients for dose assessment of impermeable soil cover considering long-term chemical effects are set based on the following values after 1,000 years.
- The lower soil cover placed around the impermeable soil cover should not change the hydraulic conductivity due to chemical effects, because the montmorillonite in the impermeable soil cover will remain even after chemical effects.

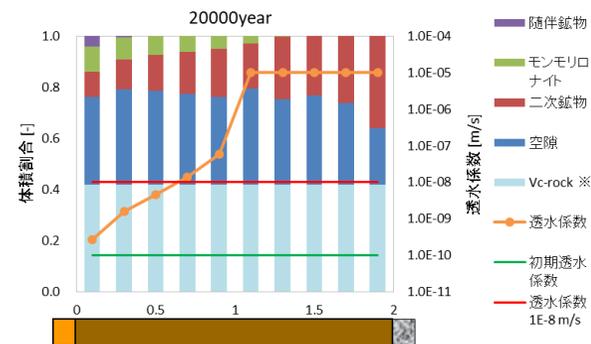
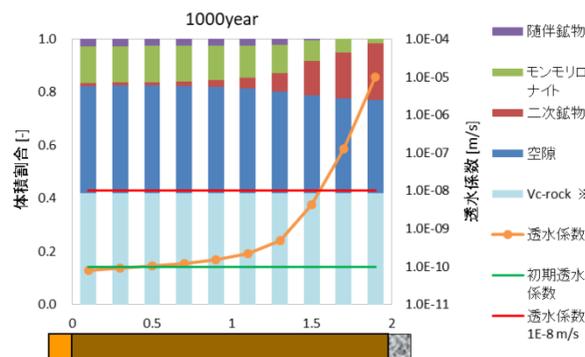
No. 3

| | No.3 [m/s] | |
|------------|------------------------|------------------------|
| | Likely scenario | Less-likely scenario |
| 0 year | 1.00×10^{-10} | 1.00×10^{-10} |
| 1,000 year | 1.01×10^{-10} | 1.02×10^{-10} |



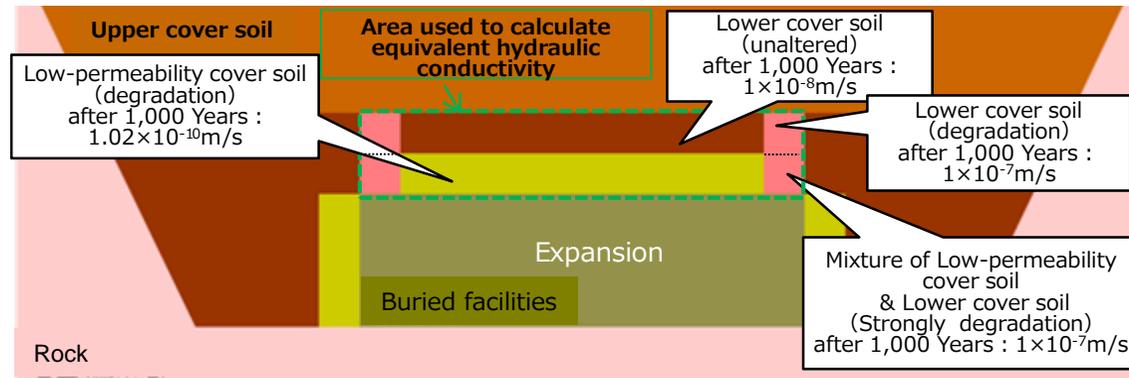
No. 1

| | No. 1 [m/s] | |
|------------|------------------------|------------------------|
| | Likely scenario | Less-likely scenario |
| 0 year | 1.00×10^{-10} | 1.00×10^{-10} |
| 1,000 year | 1.42×10^{-10} | 1.84×10^{-10} |

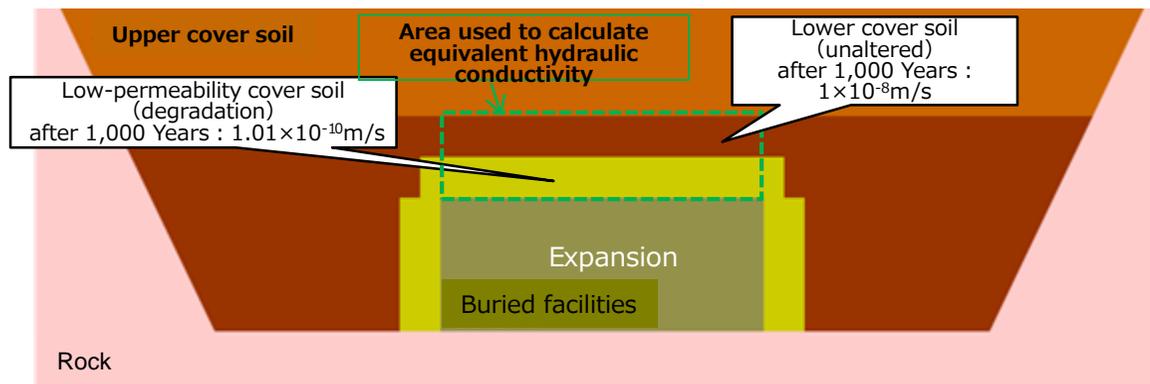


Condition setting of permeability of soil cover (mechanical and chemical influences)

The hydraulic conductivity of the entire soil cover used to calculate the flow rate through the facility is calculated assuming that the soil cover on top of the buried facility is subjected to mechanical and chemical influences.



Example of estimated changes in condition and calculation of equivalent hydraulic conductivity (No.3. Less-likely scenario)



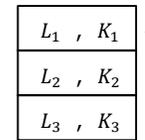
Example of estimated changes in condition and calculation of equivalent hydraulic conductivity (No.3. Likely scenario)

(Composite formula in vertical series direction)

$$K = \frac{\sum L_i}{\sum (L_i / K_i)}$$

L_i : Thickness of the i -th layer of soil cover [m]

K_i : Permeability of the i -th layer [m/s]



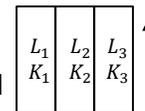
Water flow ↑

(Vertical parallel direction composite equation)

$$K = \frac{\sum (K_i \times L_i)}{\sum L_i}$$

L_i : Thickness of the i -th layer of soil cover [m]

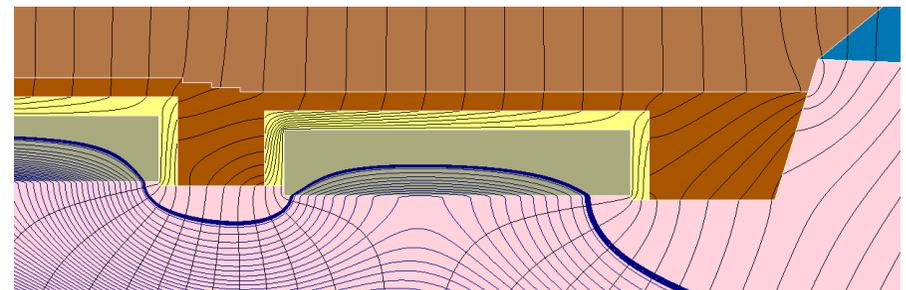
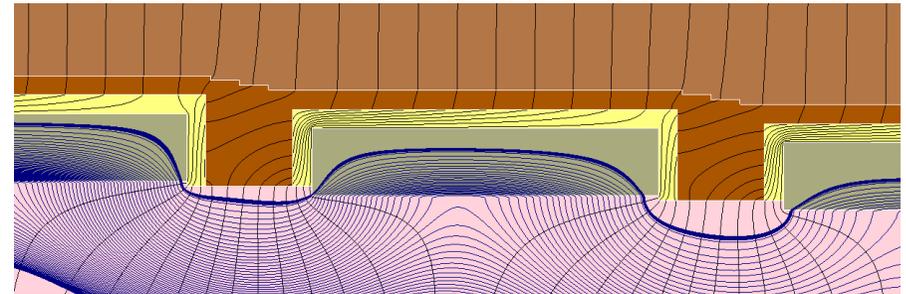
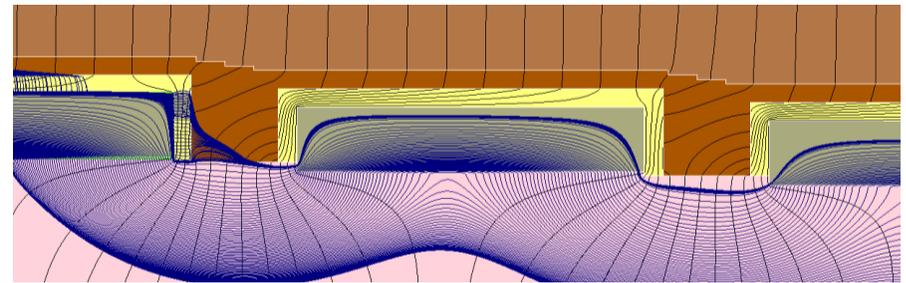
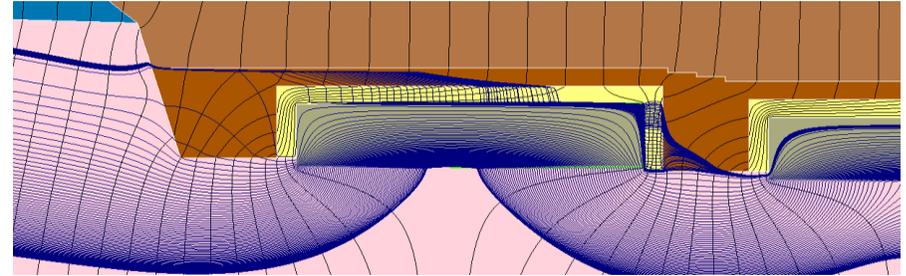
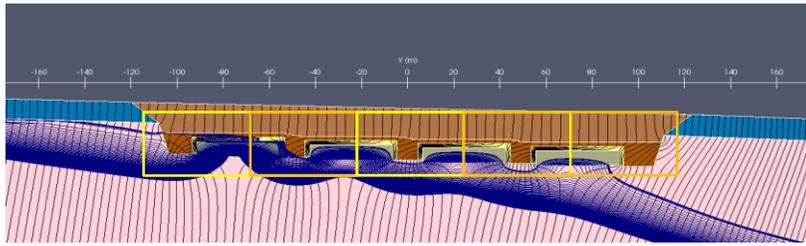
K_i : Permeability of the i -th layer [m/s]



Water flow ↑

| | Equivalent hydraulic conductivity | |
|------|-----------------------------------|-----------------------|
| | Less-likely scenario | Likely scenario |
| No.3 | 1.5×10^{-8} | 2.0×10^{-10} |
| No.1 | 3.0×10^{-9} | 2.5×10^{-9} |
| No.2 | 1.5×10^{-8} | 2.0×10^{-10} |

Groundwater Flow Analysis



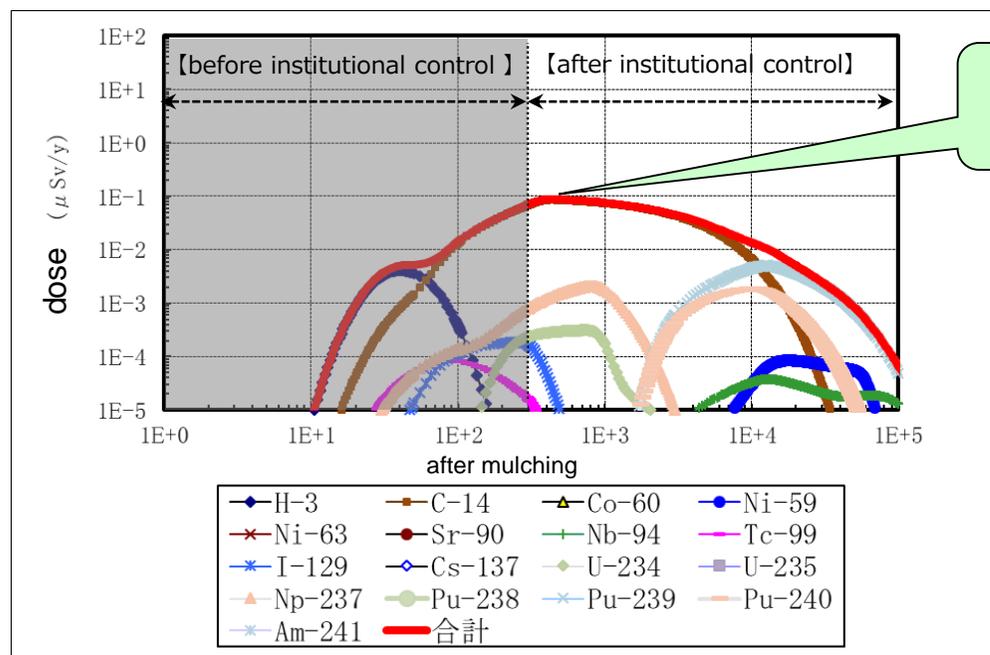
Setting of living environment conditions (setting of individuals to be evaluated)



- The individuals shall be those who live in and around the site or in the general lifestyle currently recognized in Japan, and shall be adults who represent the population that is exposed to relatively high exposure.
- In the likely scenario, the individuals to be evaluated are assumed to be residents.
- In the less-likely scenario, the individuals to be evaluated all of the following.

| target group | Lifestyle |
|----------------------------|--|
| Fishermen | The target population is people who live in the landfill site, and it is assumed that marine products to which radioactive materials are transferred are consumed at home in a conservative manner. Other products are assumed to be consumed from general marketed foods. |
| Agricultural workers | It is assumed that agricultural products to which radioactive materials are transferred will be consumed by the residents of the waste burial sites for their own consumption on a conservative basis, and that other food products distributed in general markets will be consumed by the residents. In the case of water use, rice cultivation using stream water containing radioactive materials for irrigation is assumed. |
| Livestock Industry Workers | The target population is the people who live in the waste burial sites, and it is assumed that livestock products to which radioactive materials are transferred are consumed by them for their own consumption in a conservative manner. However, exposure due to ingestion of livestock products to which radioactive materials are transferred is not assumed. |
| Construction workers | The target population is assumed to be people who live in the waste burial ground and consume food products distributed in the general market. It is also assumed that construction workers will be working on the contaminated land. |
| resident | The target population is assumed to consume agricultural products produced in home gardens and food products distributed to the market. |

Safety Assessment Results



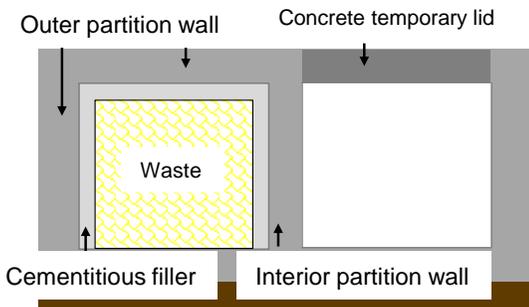
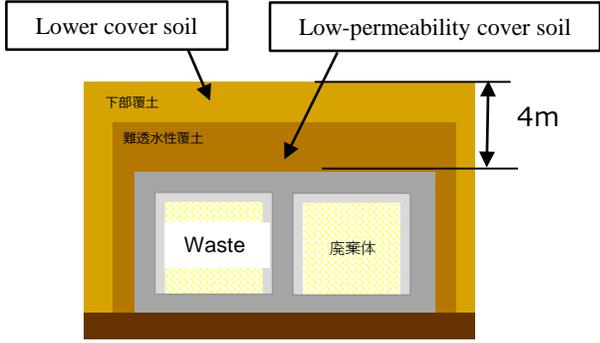
Safety Assessment Results No.3 facility (Likely scenario : inhabitants)

Safety Assessment Results

| dose | | No.1 ($\mu\text{Sv/y}$) | No.2 ($\mu\text{Sv/y}$) | No.3 ($\mu\text{Sv/y}$) | splendid ($\mu\text{Sv/y}$) | Criteria |
|----------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Less-likely scenario | fisherman ^{*1} | 3.3 | 4.0 | 3.8 | 11 | 300 $\mu\text{Sv/y}$ |
| Likely scenario | inhabitants | 0.20 | 0.18 | 0.088 | 0.46 | 10 $\mu\text{Sv/y}$ |
| Human intrusion | Construction worker | 5.9 | 5.8 | 2.5 | | 1000 $\mu\text{Sv/y}$ (1mSv/y) |
| | inhabitants | 42 | 31 | 16 | | |

*1 : individuals to be evaluated for the highest dose

Shielding

| | | | |
|---|-------------------------------|---|-------------------------------|
| Period | ~ Completion of soil covering | Period | Completion of soil covering ~ |
| Shielding material | burial equipment | Shielding material | Covering soil |
|  | |  | |

Assessment results of radiation exposure to the public

| | No.1+No.2+No3 (μSv/y) | |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | ~ Completion of soil covering | Completion of soil covering ~ |
| external exposure | 23 | 1.0×10^{-4} ※ |

※ result of Lower cover soil surface

地下空洞型処分施設に係る技術開発について

RWMC's R&D for Intermediate depth disposal

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

藤原 啓司

Hiroshi FUJIHARA

Radioactive Waste Management Funding and Research Center

Auditorium, JSCE Headquarters

May 17, 2022

1. 中深度処分とは

Concept of Intermediate Depth Disposal

2. 原環センターの中深度処分関連研究の目的

Objectives of RWMC's R&D activities

3. 取組の概要 (経済産業省からの受託研究)

Broad outlines of RWMC's Past and Current R&D (Contracted Research from METI)

3.1 地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験

The Construction Test of a Disposal Facility in the Test Cavern

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験

Study on Monitoring Methods for Confirming the Condition of Disposal Facility

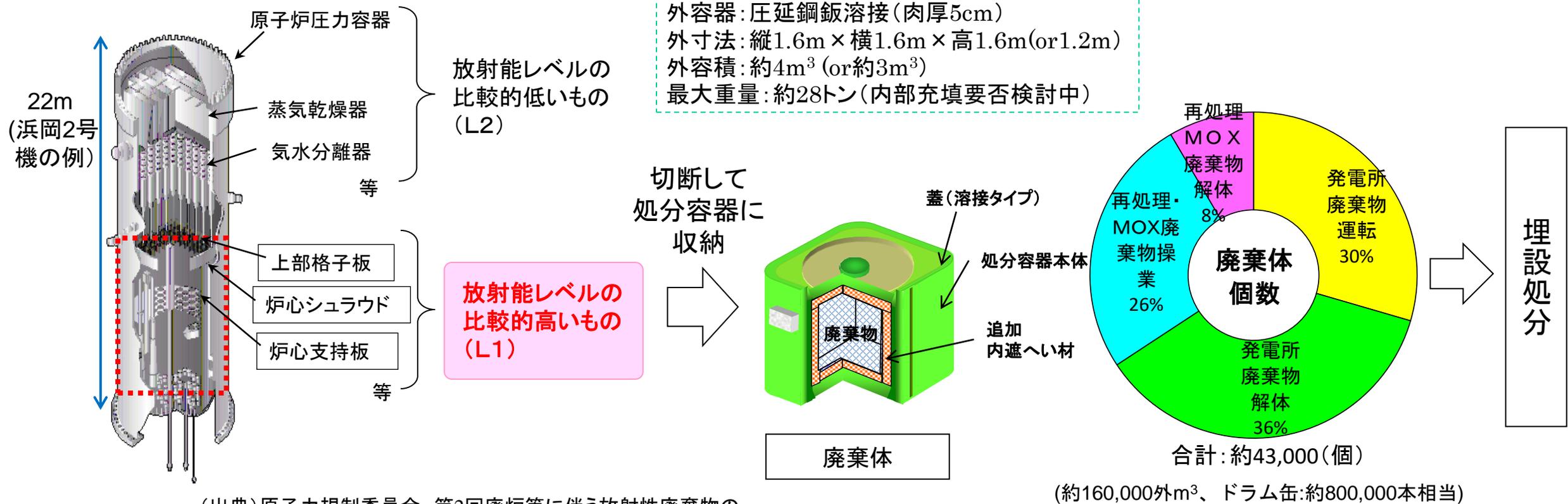
3.3 地下空洞型処分調査技術高度化開発

Study on Advanced Methods for Evaluating Underground Environment and Designing Disposal Facility

1. 中深度処分とは - 廃棄体・処分容器

- 原子炉施設や再処理施設等の運転と解体から発生する「低レベル放射性廃棄物」のうち、「放射能レベルが比較的高い廃棄物」(L1廃棄物)

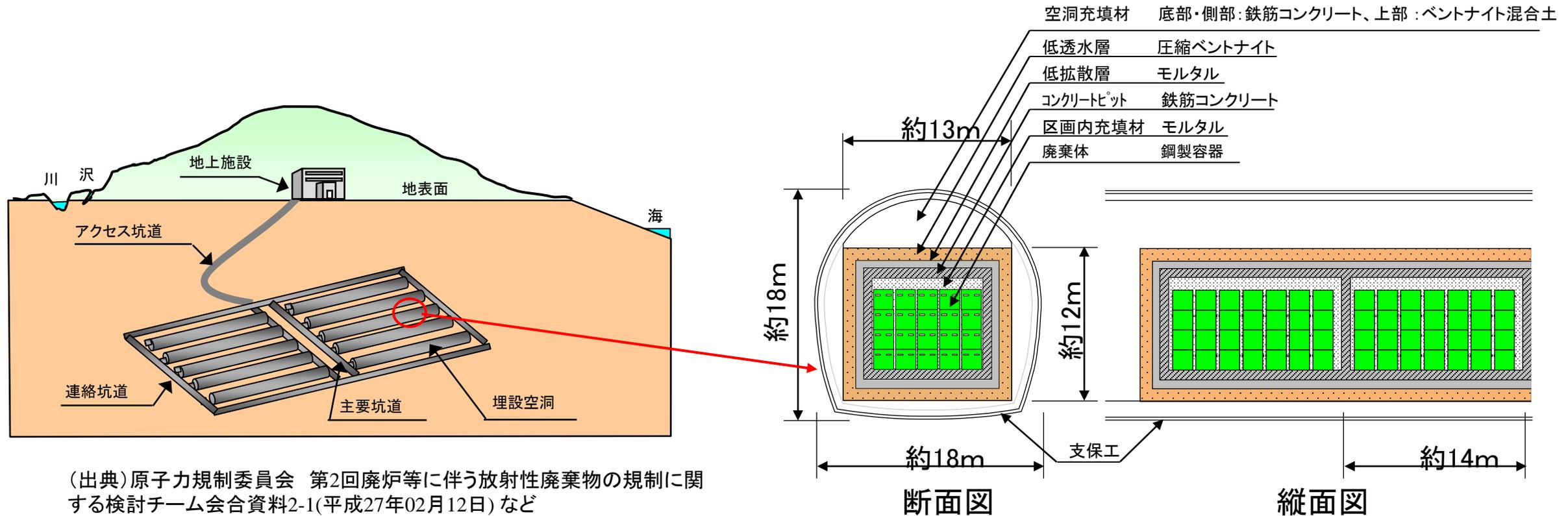
⇒ 廃棄物の収納効率を良くするため、大型角型容器の採用が検討されている



(出典)原子力規制委員会 第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合資料2-1(平成27年02月12日) など

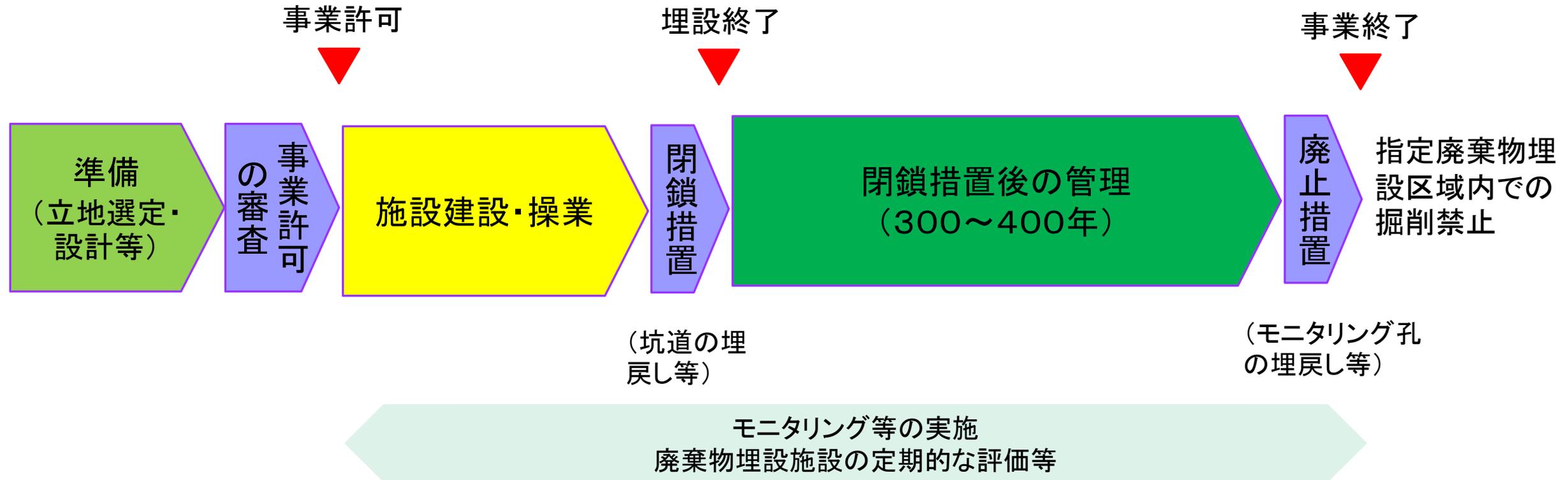
1. 中深度処分とは - 処分施設 の概念・特徴

- 中深度処分は、住居建設などの一般的な地下利用のほか、高層建築物の建設、地下鉄、上下水道、共同溝などの利用を想定しても十分に余裕のある深度（法令で地表から深さ70m以上の地下）に処分する方法となっている。
- 放射性物質の移行は、「廃棄物・廃棄体」、「天然バリア」、「人工バリア」により長期にわたり抑制する。



1. 中深度処分とは -事業の流れ

- 事業者による事業の継続性、廃棄物に含まれる放射性核種の減衰の観点から、既往のピット処分を参考に、300年～400年程度の能動的管理が想定されている
- 処分施設の特徴を踏まえ、坑道埋戻し・坑口閉塞等の措置（閉鎖措置）段階がある
- 公衆と生活環境防護の観点から、規制当局が、事業開始前、埋設施設を含む立体的な区域を掘削制限区域として指定する



2. 原環センターの中深度処分関連研究の位置付け

- 廃炉等に伴って生じる廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分場確保に向けた取組を着実に進めることを基本としつつ、**処分の円滑な実現に向け、国として、必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。**（第6次エネルギー基本計画,令和3年10月）

経済産業省

中深度処分について、その円滑な実施に向けた**基盤的な技術開発**を実施する。

- 地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験（2005～2014年度）
- 地下空洞型処分施設機能確認試験（2015～2019年度）
- 地下空洞型処分調査技術高度化開発（2020年度～）

成果の公表

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/library06.html

公募研究

原環センター

1976年設立以来、我が国唯一の放射性廃棄物に特化した中立の調査研究機関として、学界、産業界の知見も活用して、幅広い調査研究を実施している。

廃棄物発生者
(電気事業者等)

低レベル放射性廃棄物全般について、合理的な処理処分の実現に向けた**個別具体的な技術課題の解決策**を検討する。

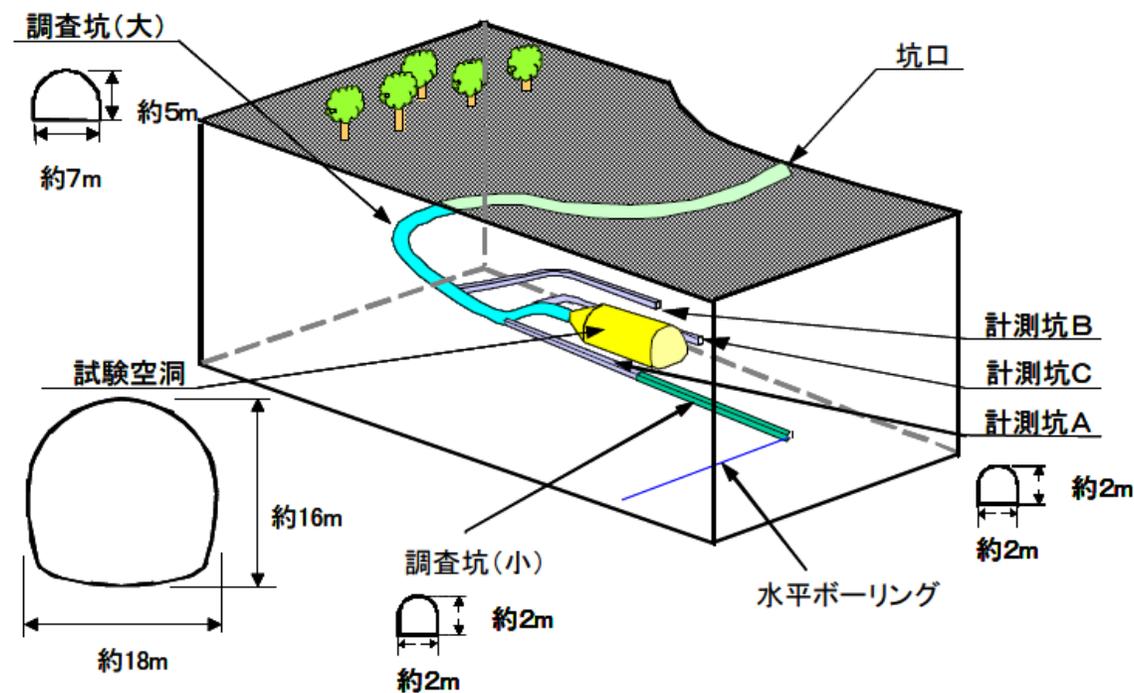
- 放射能評価
- 廃棄体製作
- 規制要求への適合性
- 安全性・信頼性の説明性
向上 等

協力

3. 1 地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(1/9)

目的: 実際の地下環境条件において中深度処分で想定されている実規模大の模擬施設を構築し、施工技術や施工品質を確認する。あわせて、模擬施設及び周辺岩盤の挙動計測等を行い、その健全性を確保する。

実施場所: 日本原燃(株)の試験空洞内 他

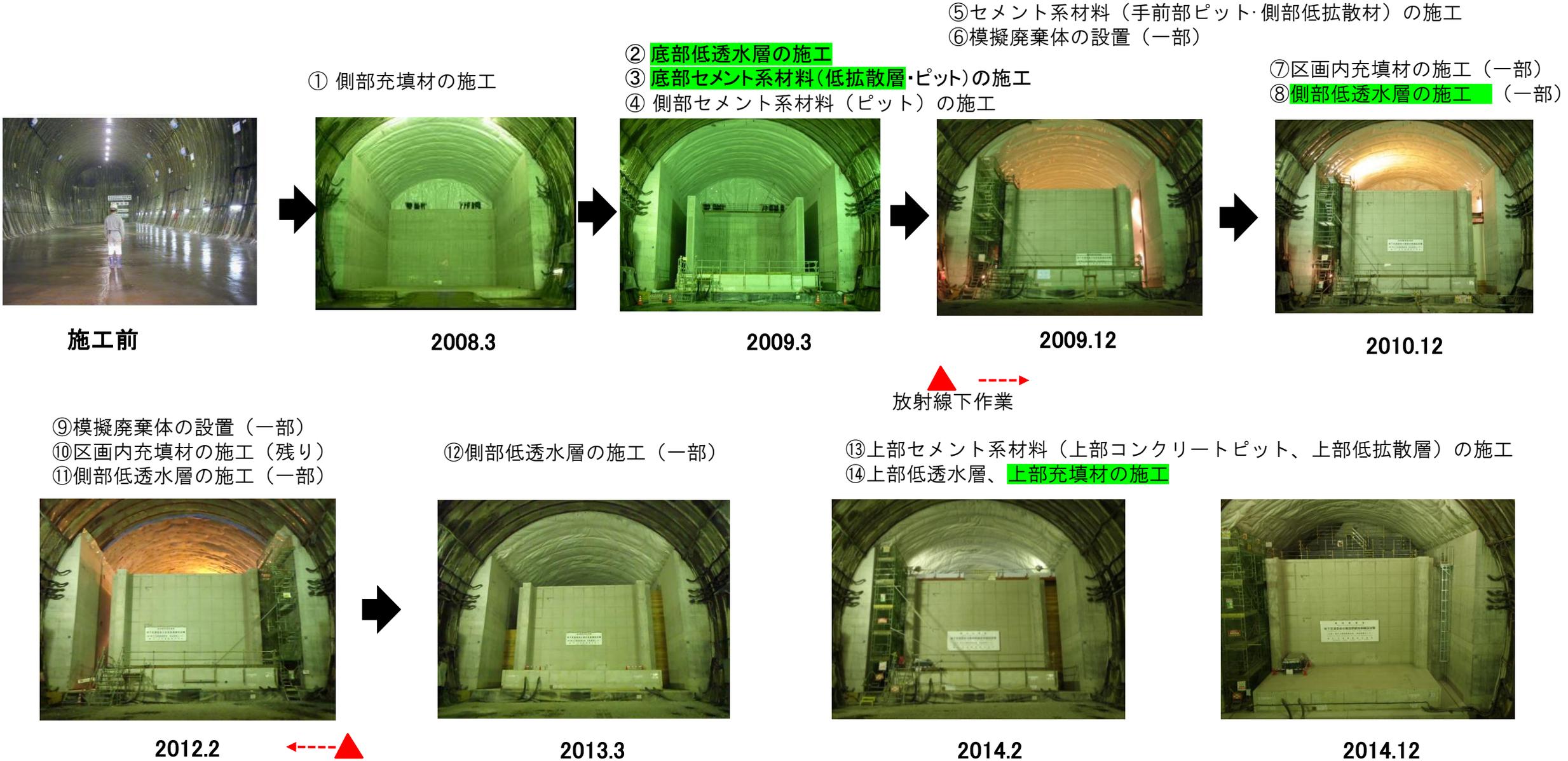


調査坑概念図

試験空洞：幅約18m、高さ約16m、長さ約70mの大きさで、空洞底部の標高が約-90m

(出典)日本原燃(株):低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査結果について(2006)

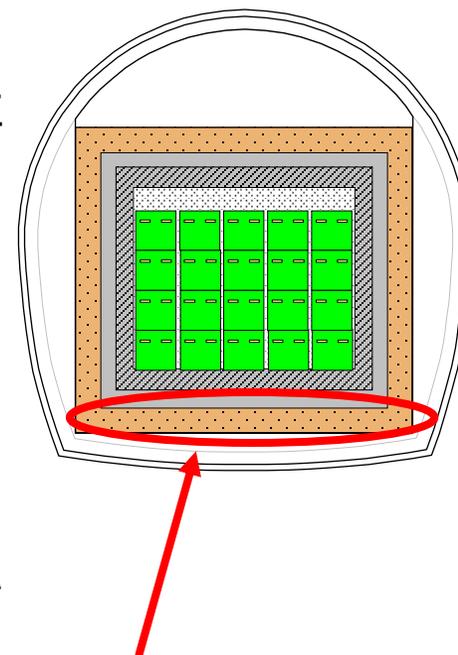
3. 1地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(2/9)



3. 1地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(3/9)

施工試験状況: ①底部低透水層の施工

- 使用材料: 100%ベントナイト(粒状ベントナイト:クニゲルGX(粒径10mm以下))使用
 - 粉末ベントナイトに比べ、低い締固めエネルギーで高い密度が達成できること、など
- 施工時の管理目標値:
 - 透水係数 $5.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 以下
 - 乾燥密度 $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$, 含水比 $21 \pm 2\%$
- 試験結果:
 - 低透水性や力学性能を損なうような欠陥を生じさせず、均質な部材を構築するための低透水層の施工方法と、構築後の部材の初期性能を確認した。



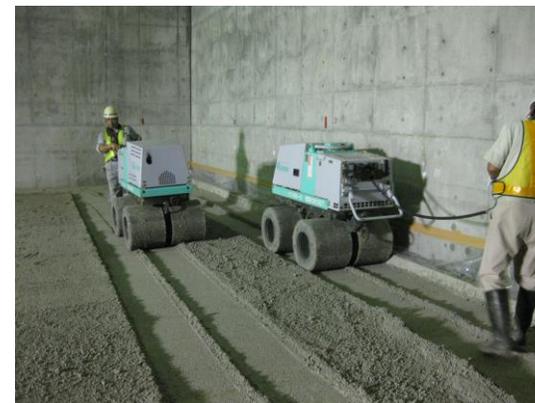
空洞内の湿度が高い条件(夏場)では結露やローラ面へのベントナイト付着(初期転圧時)が発生



アスファルトフィニッシャーにより敷均し



大型振動ローラにより転圧



端部は小型振動ローラにより転圧

3. 1地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(4/9)

施工試験状況: ②側部低透水層の施工



人手による吹付



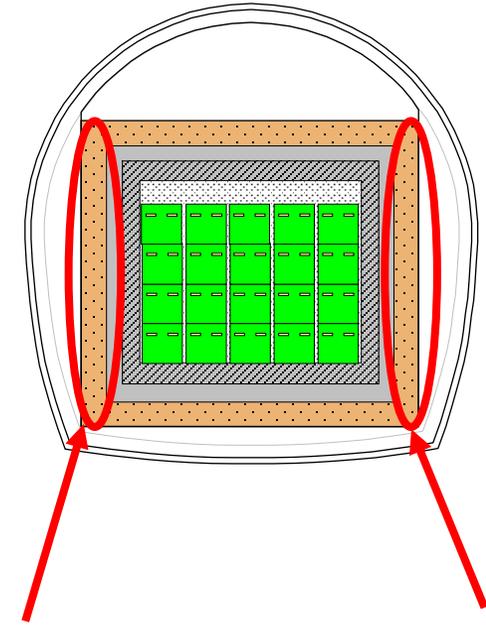
敷均し機械による敷均し



ロボットによる吹付



小型振動ローラによる振動転圧



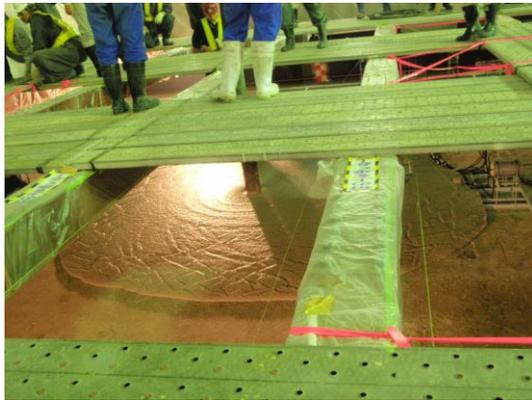
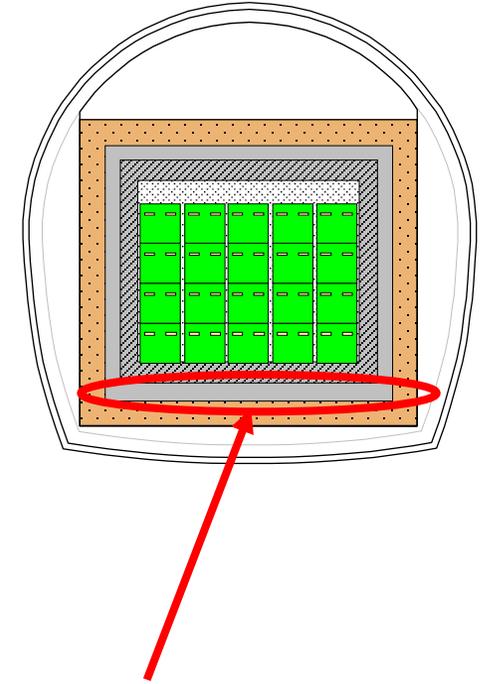
(吹付工法)

(転圧工法)

3. 1地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(5/9)

施工試験状況：③底部低拡散層の施工

- 使用材料：高流動、低発熱系のモルタル(膨張材添加)
 - 水みちを生じさせる可能性のある粗骨材や鉄筋等を使用しない
 - 一度に打込むことで低拡散性の弱部になると考えられる打継目をできる限り排除
 - 温度変化に伴うひび割れ発生を抑制 等
- 施工時の管理目標値
 - 実効拡散係数 $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 以下、部材厚さ0.6m(-5mm 以上+15mm 以下)
- 試験結果：
 - 高流動モルタルの大量・一括打込みの施工性、品質(部材の厚さ等の出来形)、初期性能(拡散係数等)から、極小さな拡散係数の低拡散材の構築が可能な施工技術・施工方法を確立した。また、ひび割れ発生抑制技術の有効性を確認した。



モルタル供給状況



流動性の低下現象
(ベントナイト上では粗度係数が大きい)



バイブレータ使用状況

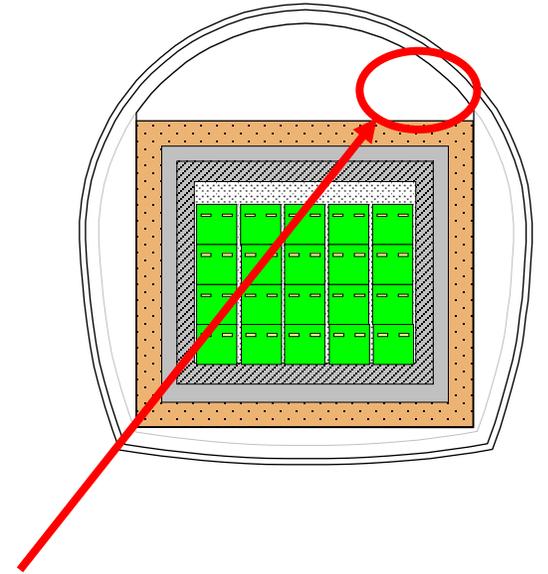


左官仕上げ状況

3. 1地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(6/9)

施工試験状況：④空洞充填材(上部)の施工

- 使用材料：砂+ベントナイト(+クニゲルV1:15%)
- 施工時の管理目標値
 - 透水係数 1.0×10^{-8} m/s (周辺岩盤よりも低い透水性)
- 試験結果：
 - バイブロコンパクタ等機械と吹付け機械による施工性、品質(乾燥密度・層厚さ等の出来形)、初期性能(透水係数等)から、上部の狭隘部でも、既存の施工機械・施工方法を用いて充填材の構築出来ることを確認した。



プレートコンパクタ(60kg)による予備転圧



バイブロコンパクタ(300kg)による転圧

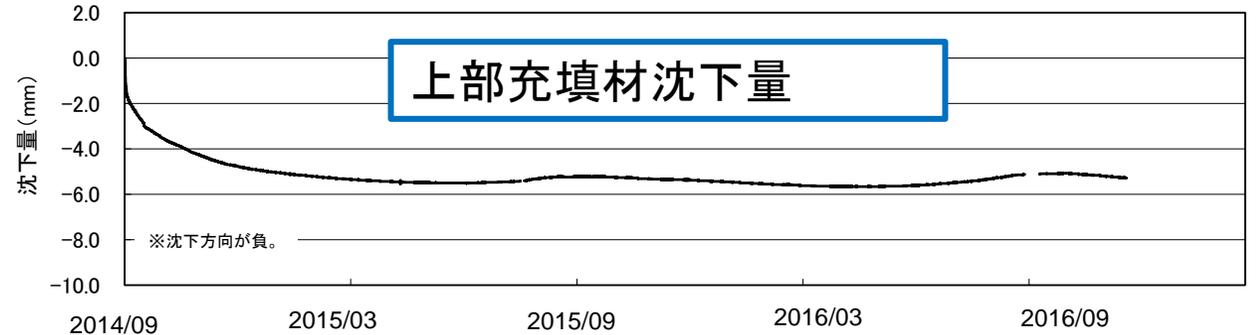
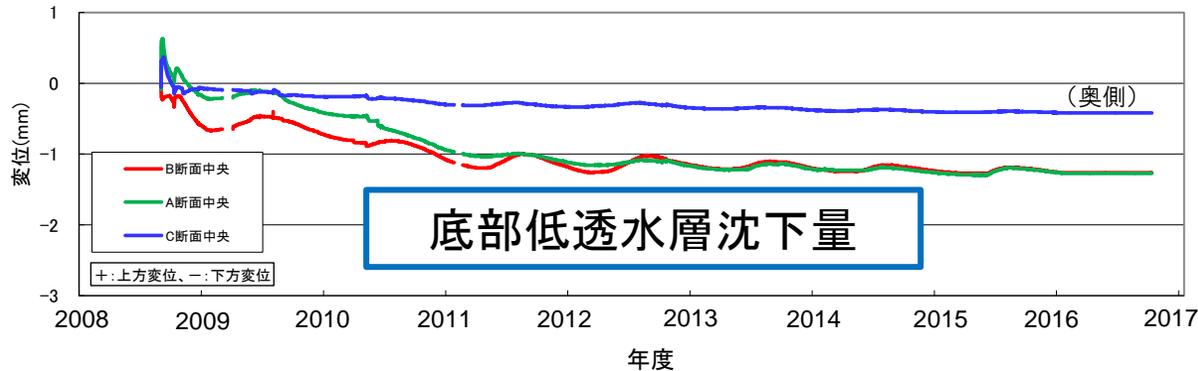
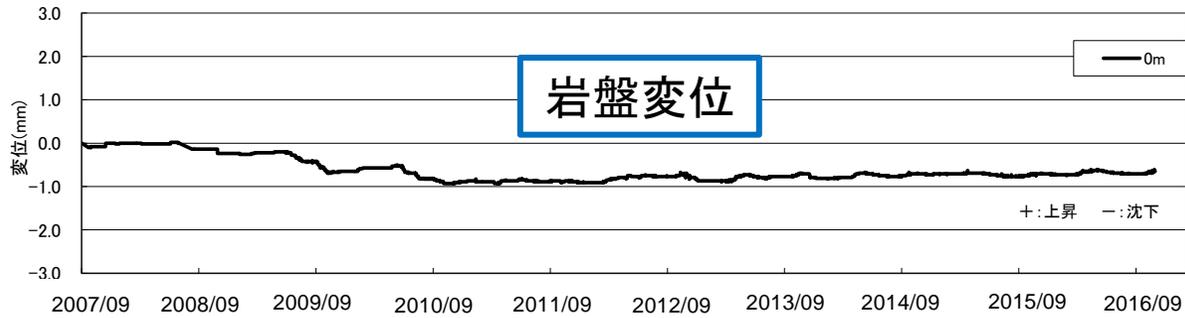
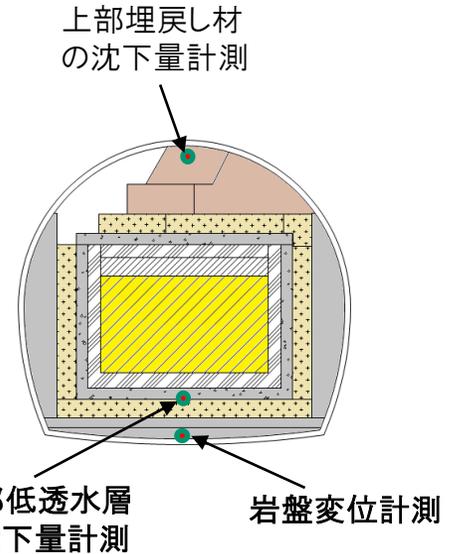


吹付け機による吹付け

3. 1 地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(7/9)

施設/岩盤挙動の計測: ① 岩盤変位等の計測

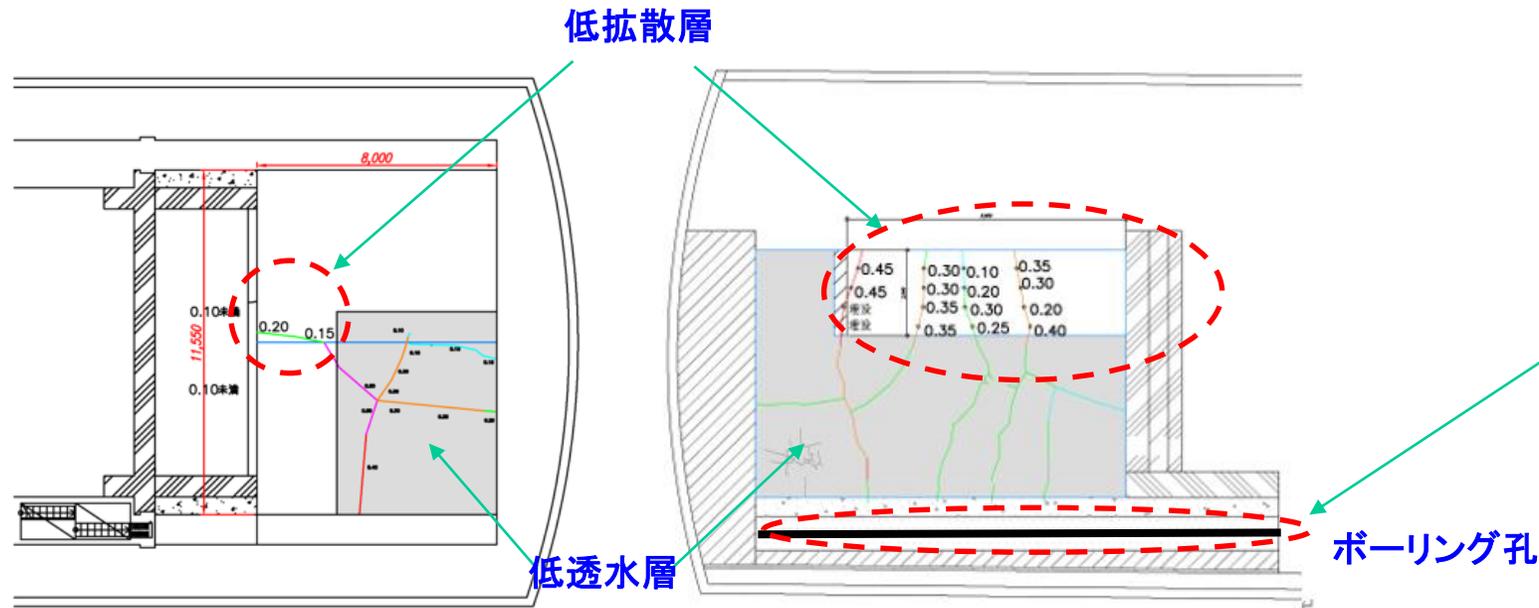
- 模擬施設に温度計やひずみ計等の計測器(593台)を設置、また、周辺岩盤に間隙水圧計及び岩盤変位計(37台)を設置し、模擬施設挙動及び模擬施設構築に伴う周辺岩盤挙動を計測(2019年度まで実施)



3. 1 地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(8/9)

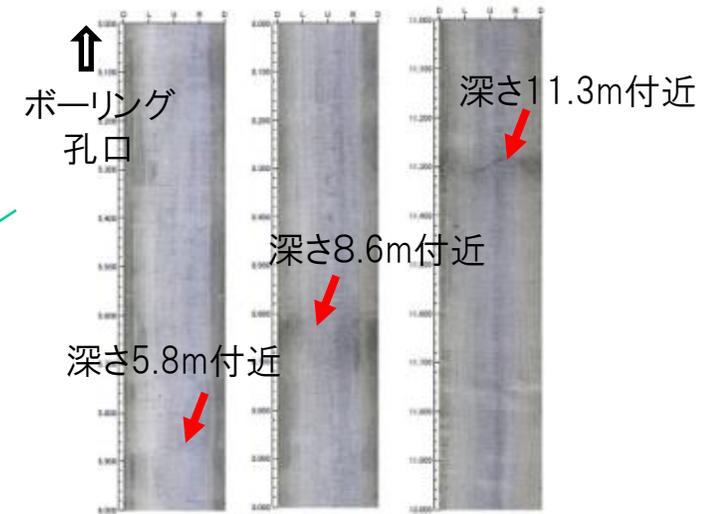
施設/岩盤挙動の計測: ② 低拡散層のひび割れ観測

- 施工後比較的初期段階にひび割れは発生するが、その後は、ひび割れの幅増大、長さの進展、あるいは、新たなひび割れの発生は観測されていない(2019年度まで実施)



上部低拡散層上面,
(2012年12月施工)
最大ひび割れ幅: 0.20mm程度

左側側部低拡散層表面
(2009年9月施工)
最大ひび割れ幅: 0.45mm程度

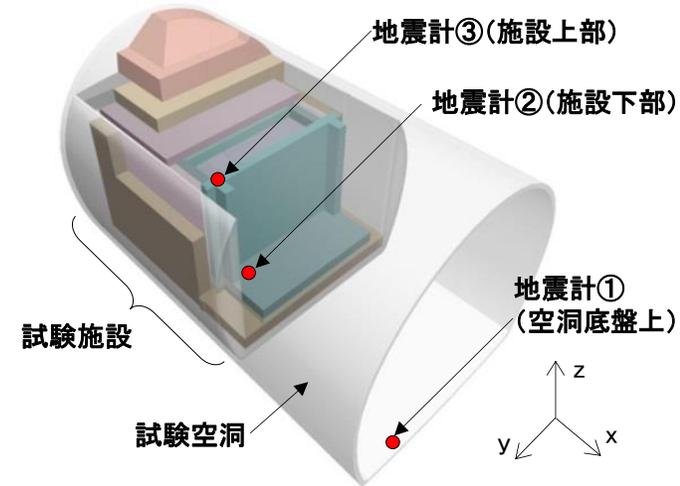
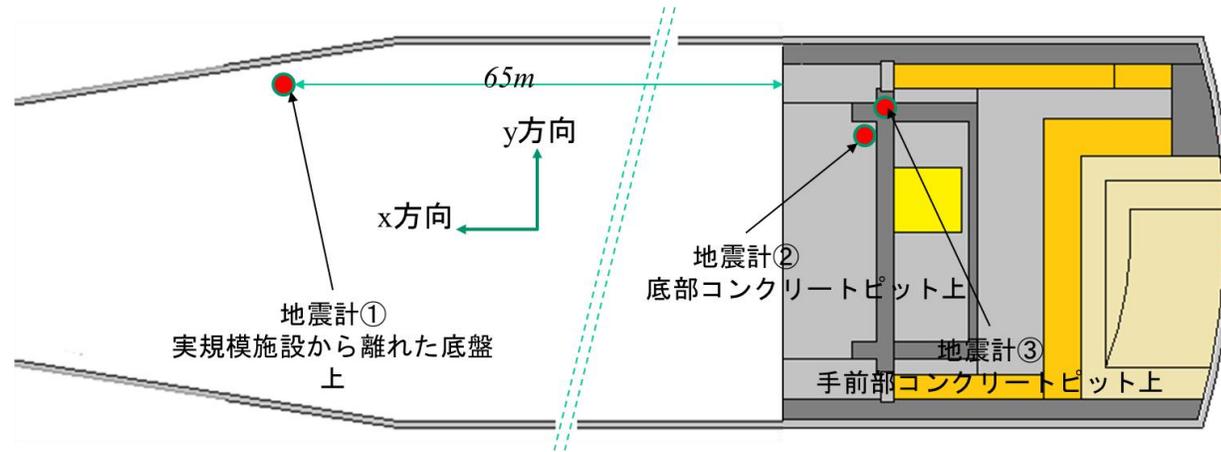


底部低拡散層(ボーリング孔内壁観察)
(2008年10月施工)
最大ひび割れ幅: 計測限界 0.25mm 未満

3. 1地下空洞型処分施設性能確証及び閉鎖技術確証試験(9/9)

施設/岩盤挙動の計測: ③地震観測

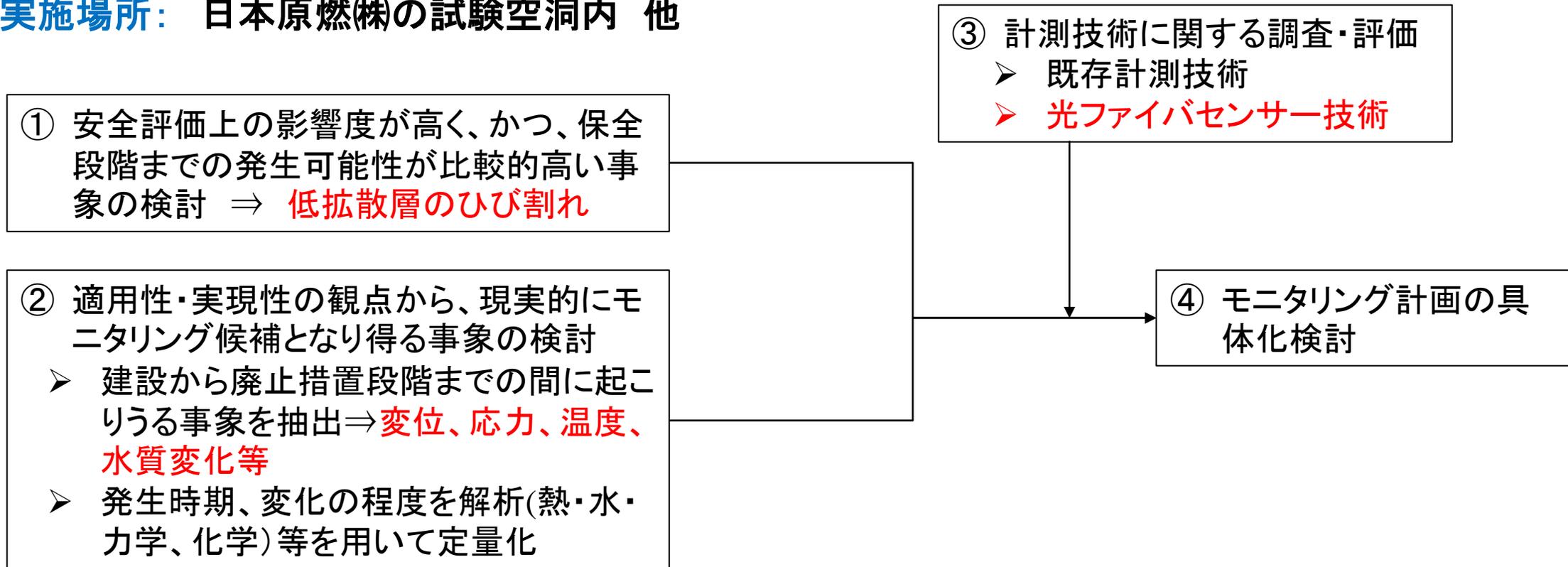
- 2013年10月より、試験空洞(1台)と模擬施設(2台)に地震計を設置し、地震動観測を実施。(継続中, 2021年度に地上部に1台追加)
 - これまでに観測された最大加速度は、2019年8月15日の青森県三八上北地方を震源とするM5.5の地震で、水平方向(x方向)で、地震計①で25.8Gal、地震計②28.7Gal、地震計③で30.7Galを記録。



3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(1/14)

目的: 処分施設の閉鎖後の長期的な管理に資するため、2014年度までに試験空洞内に構築した模擬施設も活用し、人工バリアや周辺岩盤の長期に亘る機能を確認するためのモニタリング計画を検討する。

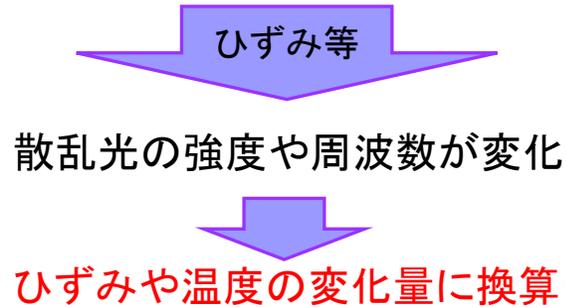
実施場所: 日本原燃株の試験空洞内 他



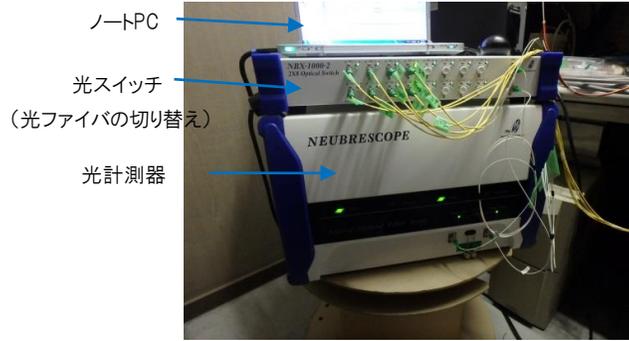
3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(2/14)

光ファイバセンサー技術の原理

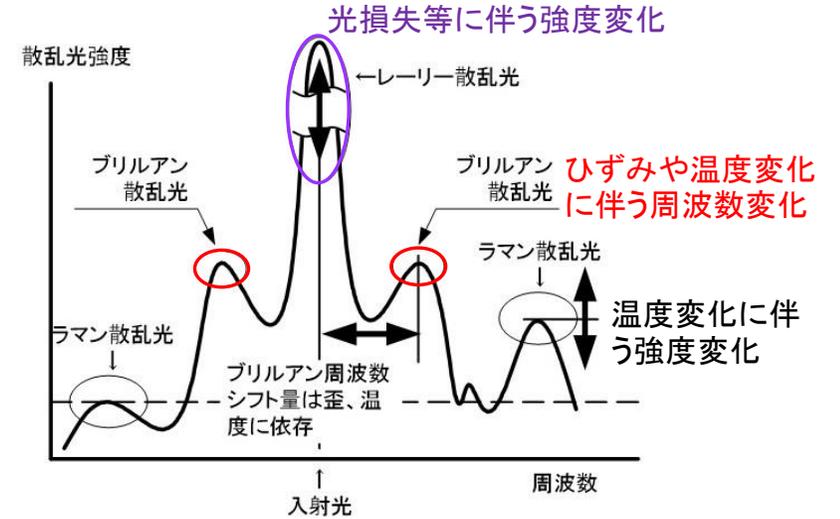
光ファイバーにパルス光を入射し散乱光を発生させる



(注)ブリルアン散乱用にPPP-BOTDA方式、レイリー散乱用にTW-COTDR方式 (Neubrex社製NBX-7020を使用)



光ファイバセンサー用計測器



散乱光のスペクトル

光ファイバセンサー技術の特徴

- 中深度処分施設のモニタリングに光ファイバセンサー技術を活用する場合の利点は次のとおり。
 - 点センサーではなく、**分布計測が可能**であるため**ケーブル量を最小化**することが可能
 - 既存の計測器よりも**高耐久**
 - ひずみ、温度、(圧力)を同時計測
 - センサー部に**電源が不要**



実規模施設に設置した既存計測器のケーブルの束

| | 人工バリアの欠損断面積 | 備考 |
|-------|--------------------|--|
| 光ファイバ | 0.8cm ² | 計測点数: <u>400</u> (長さ10m, 分解能 2.5cm) |
| 既存計測器 | 79cm ² | 計測点数: <u>30</u> |

面積100倍 取得データ数約10倍

※ 光ファイバでは圧倒的に小さな欠損で多くのデータを取得可能

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(3/14)

□ 閉鎖措置段階以降に廃棄物埋設地の状態をより直接的に把握するためのオプションとして、光ファイバセンサー技術の適用性を検討

➤ ラボ試験

①: 耐久性の検討

②: 敷設方法の検討

③: 圧力計測の検討

➤ 既設の実規模施設を活用した試験

①: 温度計測

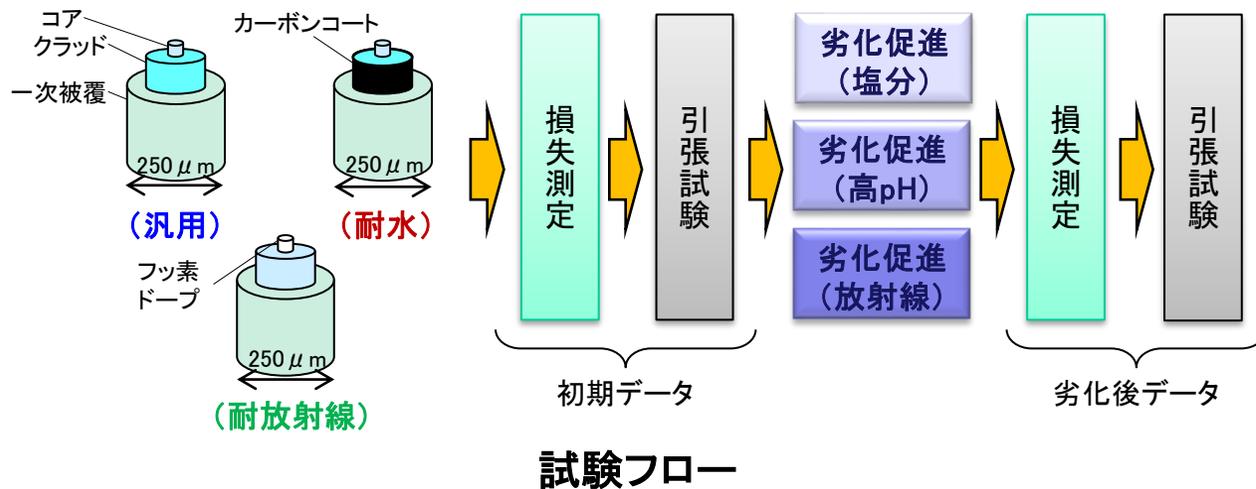
②: 人工ひび割れ試験(手前コンクリートピット・上部低拡散層)

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(4/14)

ラボ試験①: 耐久性の検討

- 現地環境下で想定される劣化要因(塩分・高アルカリ・放射線)に対する光ファイバの破断強度変化
 - 塩水: 汎用タイプは浸漬期間の増加により劣化が進行、耐水タイプはほとんど変化しない
 - 放射線: 汎用タイプ及び耐放射線タイプとも変化なし
 - 高アルカリ: 汎用タイプは10日間の浸漬で激しく劣化、いっぽう、耐水タイプはほとんど変化しない

- ラボ試験から推定した100年経過時点の単位長さ当たりの累積破断個数より、環境温度29°C、光ファイバ長5,000mでの累積破断確率は 10^{-6} 未満(通信分野で一般的)と推定される。
- なお、解析によれば、低拡散層表面の温度は環境温度(15°C)と同程度で推移するため、累積破断確率は十分に小さい値になると考えられる



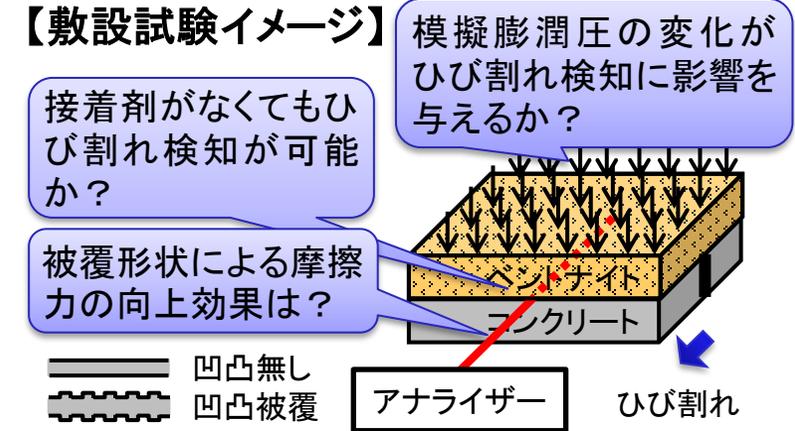
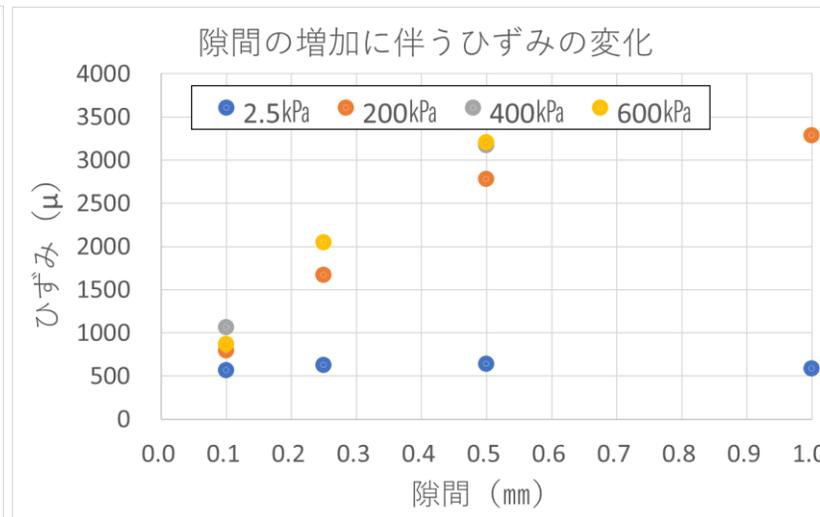
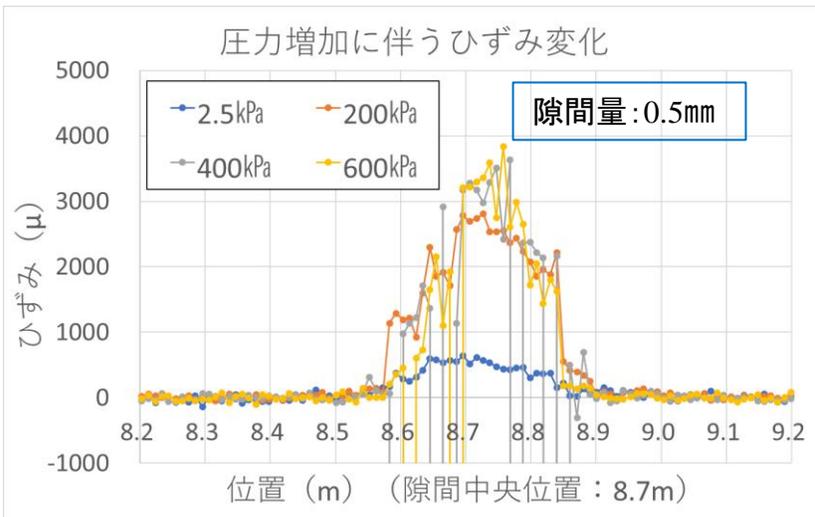
劣化促進パラメーター

| 劣化因子 | 比較ファイバ | 劣化環境 | 劣化水準 | | | | |
|------|-----------|------------------------|------|--------|---------|------|------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 塩水 | 汎用vs.耐水 | 高濃度(海水の2倍)塩水に浸漬(60°C) | 10日 | 50日 | 100日 | 200日 | 400日 |
| 高pH | 汎用vs.耐水 | 高アルカリ溶液(pH13)に浸漬(60°C) | 1日 | 3日(汎用) | 10日(耐水) | | |
| 放射線 | 汎用vs.耐放射線 | 200Gy/hを照射 | 5h | 100h | | | |

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(5/14)

ラボ試験②: 敷設方法の検討

- ひずみ分布計測では、接着剤により、光ファイバセンサと被計測物との一体性を確保するが、その一体性が長期的に維持されるとは考えにくい。そこで、接着剤に期待しない光ファイバセンサの敷設方法の試験を実施
- 試験装置で付与する圧力を変えながら実験し、摩擦力向上策(凹凸被覆)の効果、隙間開閉による影響などを確認 ⇒ 試験の結果、被覆材表面凹凸による有意な差異は認められなかった
- 感度は圧力によって異なるものの、ベントナイト膨潤圧想定値(最大1.5MPa)よりも小さな圧力範囲で検知が可能であった

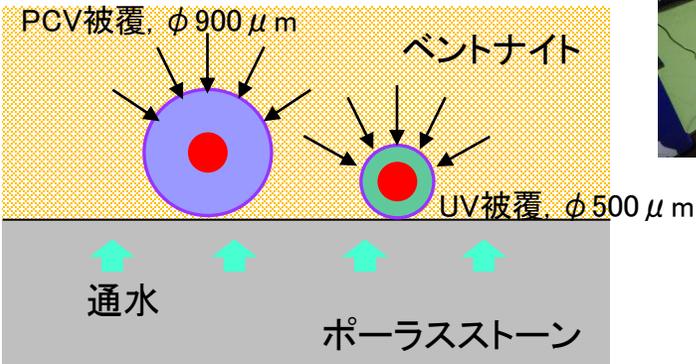


圧力の増加に伴うひずみの増加を検知

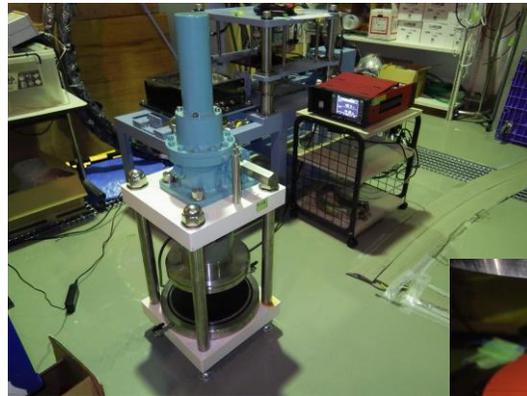
3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(6/14)

ラボ試験③: 圧力計測の検討

- 光ファイバセンサーによって、ひずみ・温度分布だけでなく圧力分布を計測できれば、低透水層の膨潤圧などのモニタリングに資することができる。
- 被覆(厚、材料)の異なる二種類の光ファイバセンサを、ポーラスストーンとベントナイトを模擬した軟質ゴム材料との間に配置し、ジャッキ加圧により生じる二種類のひずみ計測結果の差から圧力状態を捉える
- 圧力の定性的な上昇傾向は確認できたが、ひずみ量は 20μ 程度と極めて微小な範囲での変動であり、精度の観点で圧力の定量化には課題



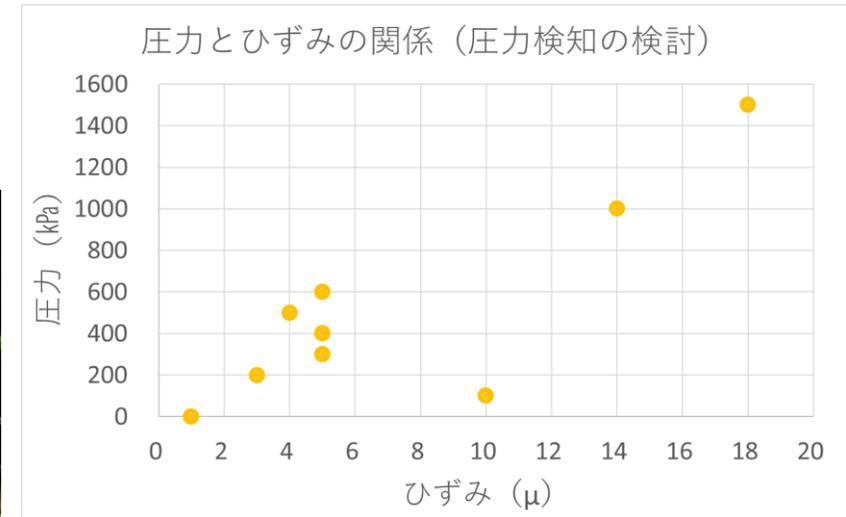
圧力計測イメージ



試験機器配置状況



軟質ゴム上への光ファイバセンサ配置

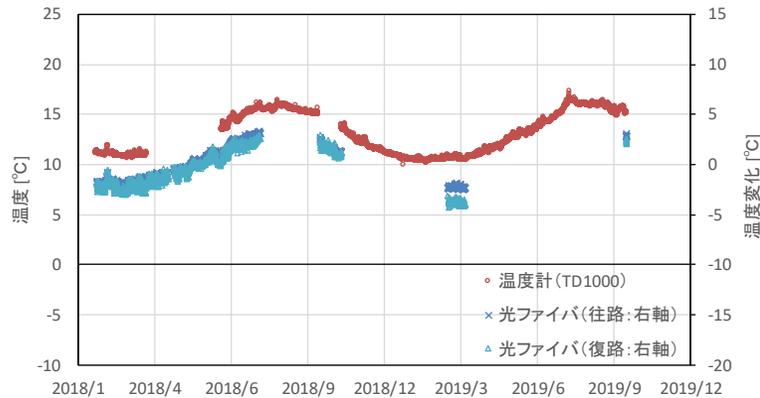


圧力増加に伴うひずみの増加を検知

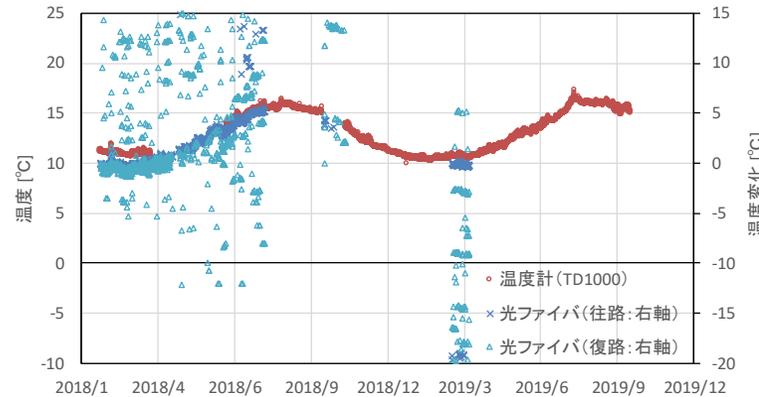
3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(7/14)

既設の実規模施設を活用した試験①: 温度計測

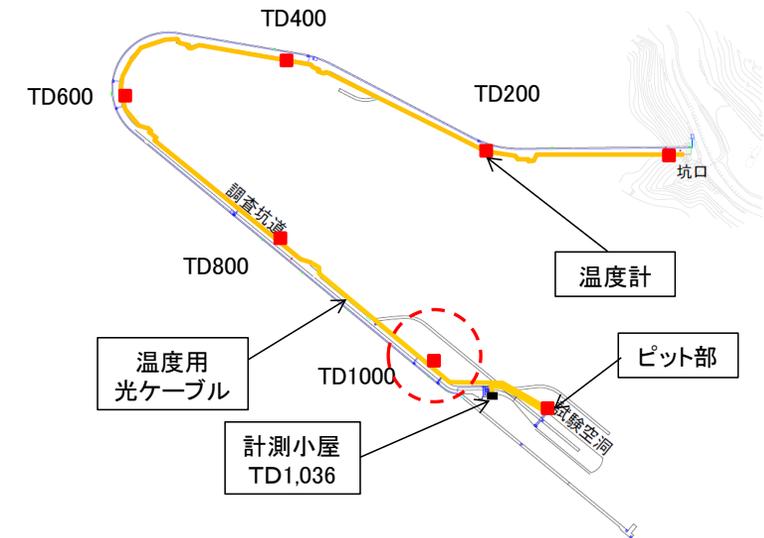
- アクセス坑道沿いに光ファイバセンサーケーブルを敷設して、ブリルアン方式とレイリー方式により、全長約2,750m(往復)における温度変化を不定期に計測した。
- その結果、ブリルアンによる温度計測は、温度計と高い相関があることを確認した。



温度計測結果 (TD1000 ; ブリルアン方式)



温度計測結果 (TD1000 ; レイリー方式)

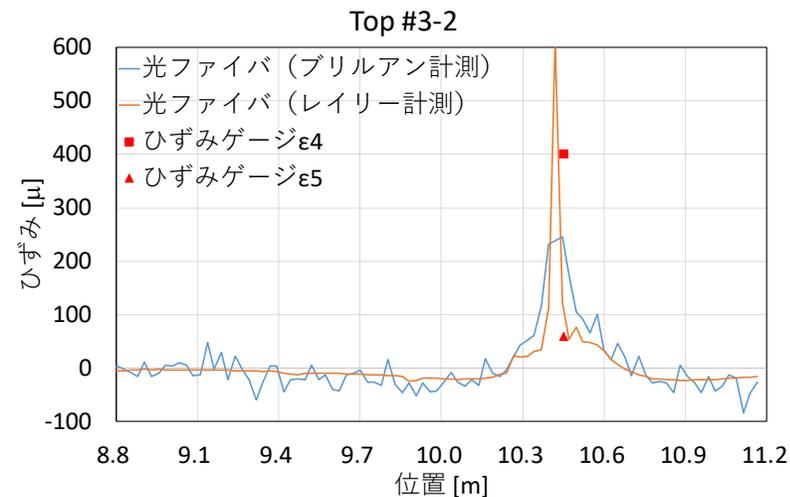


光ファイバセンサーケーブルと温度計の配置

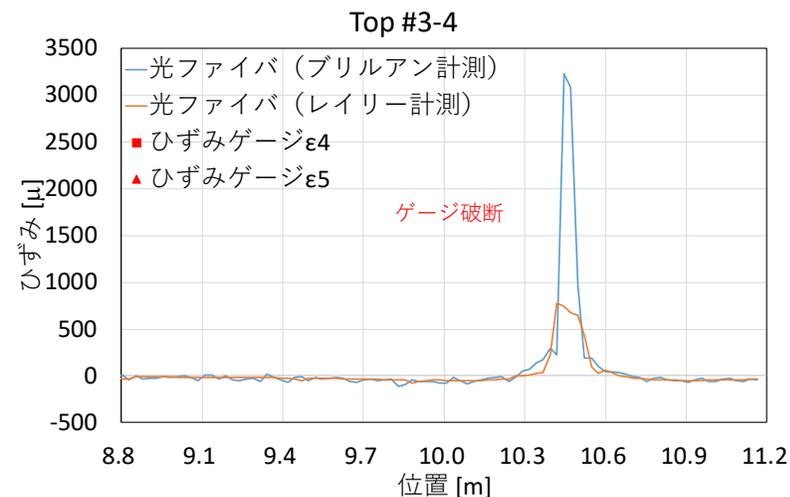
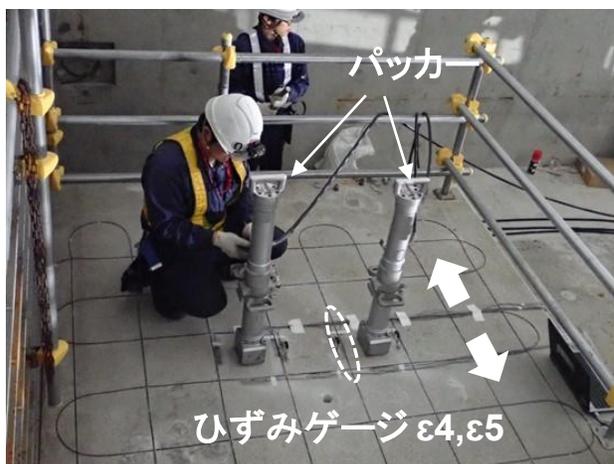
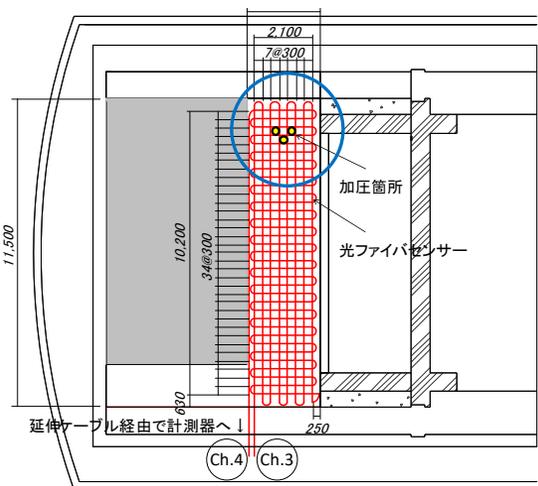
3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(8/14)

既設の実規模施設を活用した試験②：人工ひび割れ試験 (上部低拡散層)

- ひび割れの予兆となる局所的な引張りひずみについては、光ファイバセンサー(レイリー計測)の感度が高い傾向がある
- ひずみゲージが断線するような幅のひび割れについては、光ファイバセンサー(ブリルアン計測)の感度が高い傾向がある



目視ではひび割れは確認されない



目視でひび割れ発生を確認(0.2mm幅)

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(9/14)

| 段階 施設概念図 | 建設段階 | | | 廃棄物の埋設段階 | | | 閉鎖措置 | 保全 | 廃止措置 |
|-------------|-------------|--|--|----------|--|--|-------------|----|------|
| | 計測/分析項目 | | | | | | | | |
| 処分施設の変形 | 既存計測技術 | | | | | | | | |
| 低拡散層のひび割れ | 既存計測技術 | | | | | | 光ファイバセンサー技術 | | |
| 温度変化 | 既存計測技術 | | | | | | 光ファイバセンサー技術 | | |
| 裏面排水の水質 | 既存計測技術 | | | | | | | | |
| 周辺地下水の水質 | 既存計測技術 | | | | | | | | |
| 地震動 | 既存計測技術 | | | | | | 計測位置限定 | | |
| 施設内の圧力分布 | 光ファイバセンサー技術 | | | | | | | | |

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(10/14)

水質モニタリングの検討例①

- 閉鎖措置段階以降は、施設周辺のボーリング孔における地下水組成モニタリングが候補になると考えられる。
- モニタリングの位置や時期の検討に資するため、**廃止措置段階までの期間(約400年)**を対象に、解析により施設周辺の地下水を対象とした化学挙動を評価した。
 - 地下水組成が変化する範囲は施設周辺約100m程度
 - ひび割れやEDZがモニタリング値に及ぼす影響は小さい
 - 動水勾配がモニタリング値に及ぼす影響は比較的大きい
 - 人工バリアの物性値が大きく変化してもモニタリング値に及ぼす影響は小さい
 - 施設周辺にて変化するイオンは主に吹付けコンクリートに由来する
 - 地下水組成モニタリングにおいて着目すべきイオンとしては、OH⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺

(解析ケース)

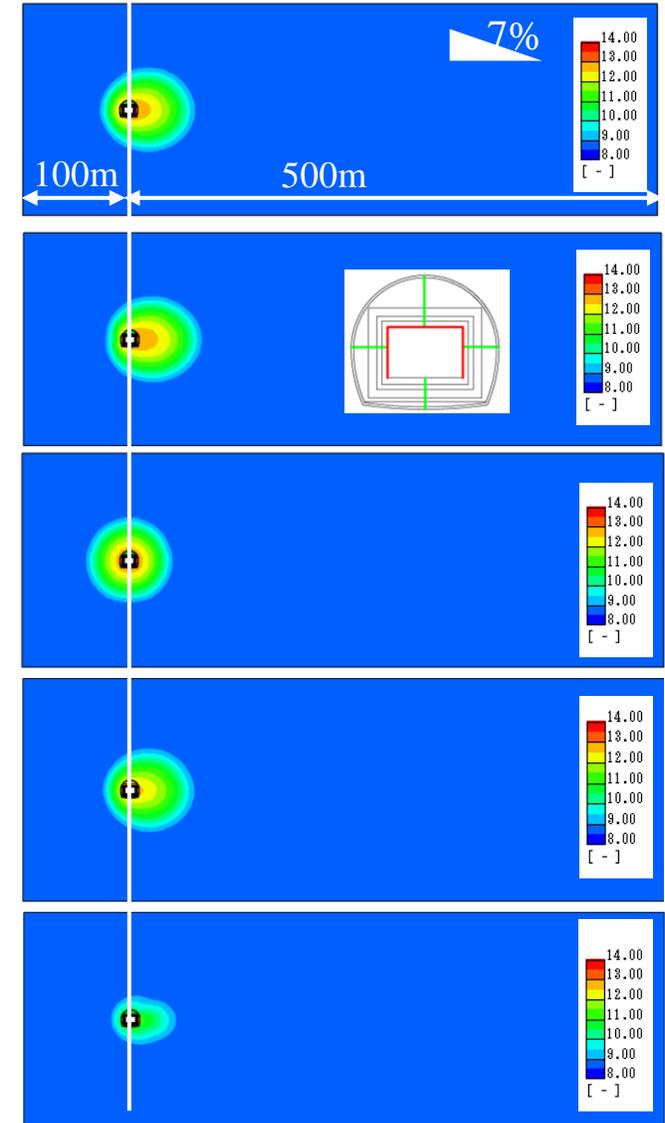
リファレンス

ひび割れ/EDZ

動水勾配 0%

人工バリア部材
の拡散係数、透
水係数が100倍

吹付けコンク
リートのみ変質
しない



pH分布(400年後)

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(11/14)

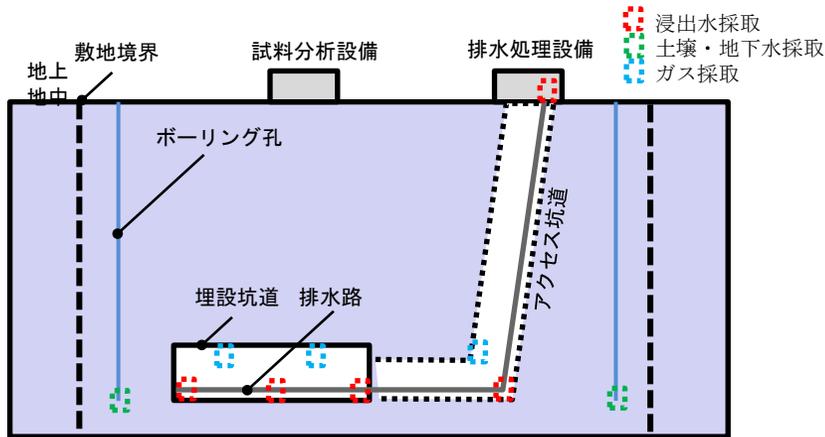
水質モニタリングの検討例②

● 閉鎖措置前:

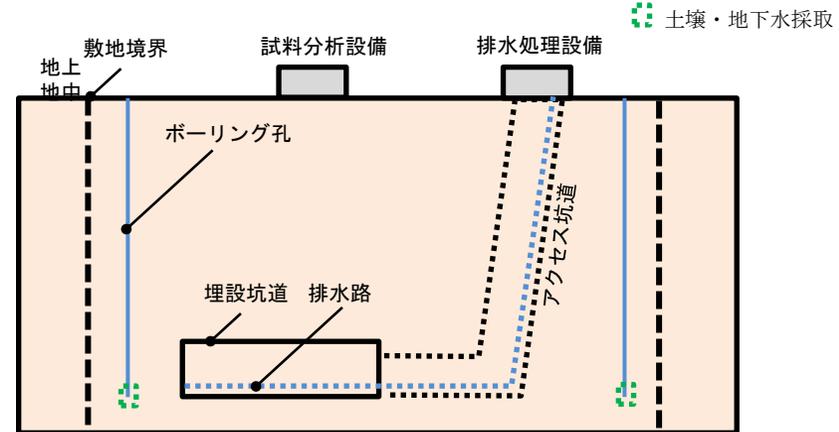
- 埋設坑道内: 浸出水は排水路や排水処理設備で採取し、ガスは検知対象の特性(比重など)を考慮した位置で採取し、分析する
- 埋設地外: 敷地内の試掘ボーリング孔(観測孔)で土壌・地下水・ガスを採取し、分析する。なお、試掘ボーリング孔位置決定には、地下水の流向や解析結果(400年間、pHや各種イオン濃度の変化が生じる範囲は、施設から約100mの範囲内)等を参考とする。

● 閉鎖措置後:

- 埋設坑道内: 資料採取不可
- 埋設地外: 敷地内の試掘ボーリング孔(観測孔)で土壌・地下水・ガスを採取し、分析する。



試料採取モニタリングのイメージ(閉鎖措置前)



試料採取モニタリングのイメージ(閉鎖措置後)

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(12/14)

低拡散層のひび割れ、温度変化のモニタリングの検討例①

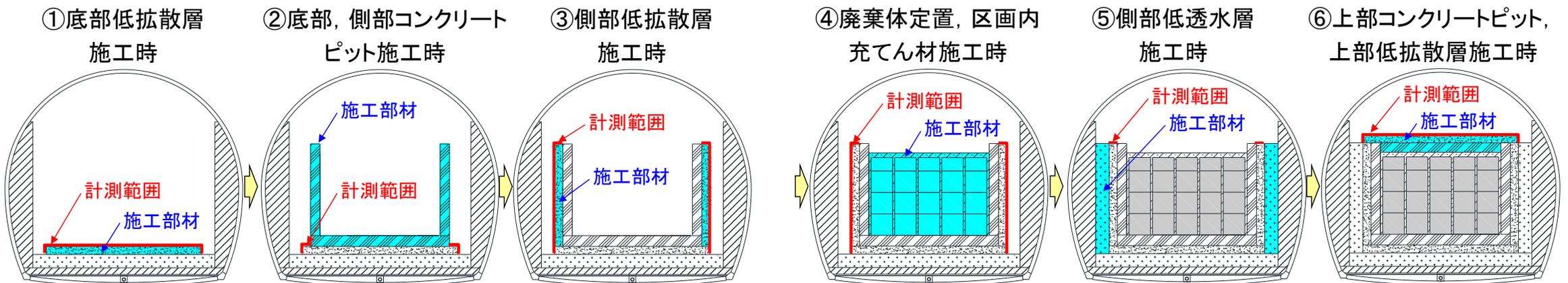
□ モニタリング方法の概要

● 閉鎖措置前:

- 低拡散層表面が露出している期間は、既存計測技術(目視又はカメラ撮影、赤外線温度計等)と光ファイバセンサー技術の両技術でひび割れ、**温度**観測を実施
- 観測部位が不可視状態となった後は、光ファイバセンサー技術による計測を実施
- なお、不可視状態となる前までに、既存計測技術と光ファイバセンサー技術による計測結果が整合していることを確認した上で、光ファイバセンサーによる計測に移行する

● 閉鎖措置後:

- 光ファイバセンサーによる計測



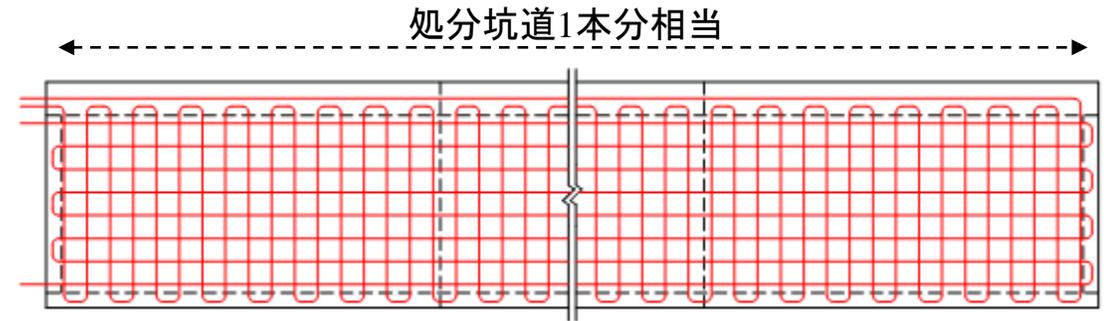
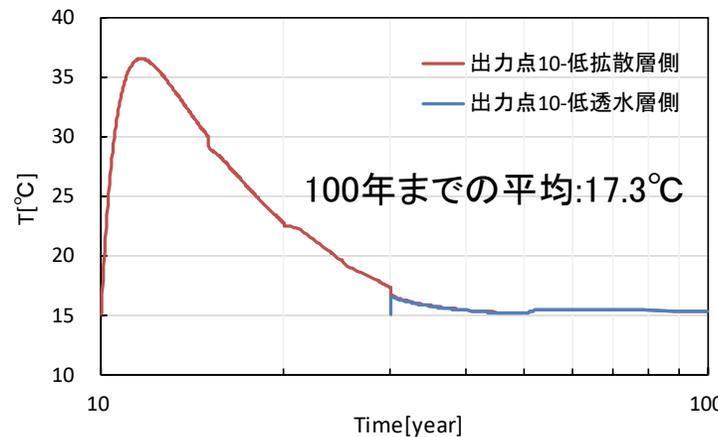
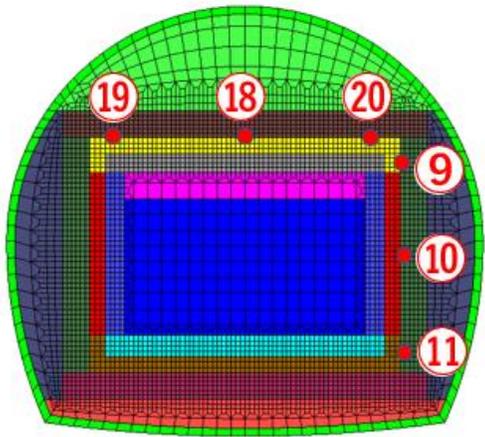
既存技術による計測時期と計測範囲

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(13/14)

低拡散層のひび割れ、温度変化のモニタリングの検討例②

□ 光ファイバセンサーの設置方法

- 低拡散層に発生するひび割れは、既設の実規模施設におけるひび割れ発生状況や施設挙動の定量化検討の結果を踏まえると、低拡散層に発生するひび割れの位置や方向を予め特定することは困難と考えられるため、**光ファイバセンサーを格子状に設置する**
- 累積破断確率、バリア貫通面積を考慮して、ケーブル延長、本数を検討
- 温度分布計測は、光ファイバセンサーを格子状に設置する必要はないが、低拡散層のひび割れ(ひずみ)計測用光ファイバセンサーで同時計測することが合理的



低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサ設置例
側部(側面図) 格子間隔:900mm 空洞横断方向1.1km, 空洞
縦断方向1.0km

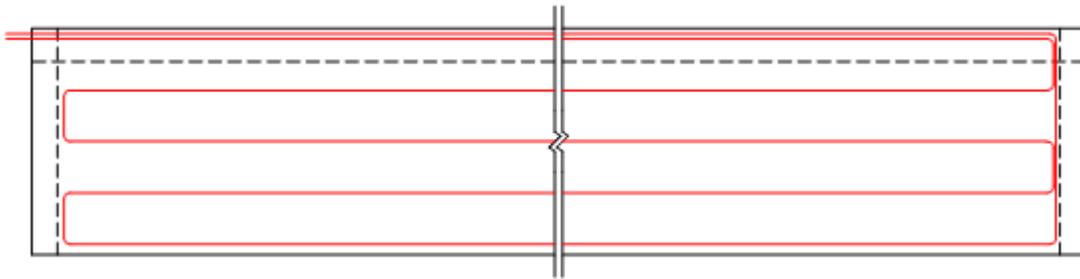
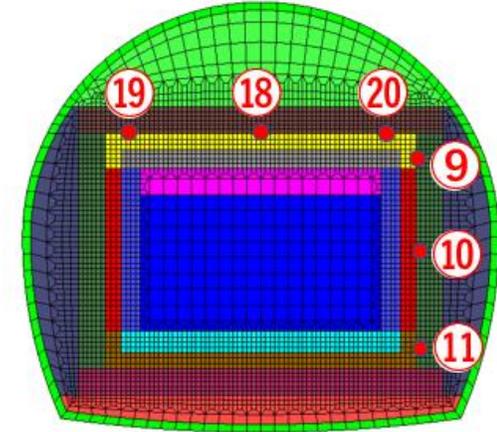
最も最高温度が高い出力点⑩(低拡散層側)の温度履歴

3.2 地下空洞型処分施設機能確認試験(14/14)

施設内の圧力分布のモニタリングの検討例

□ 光ファイバセンサーの設置方法

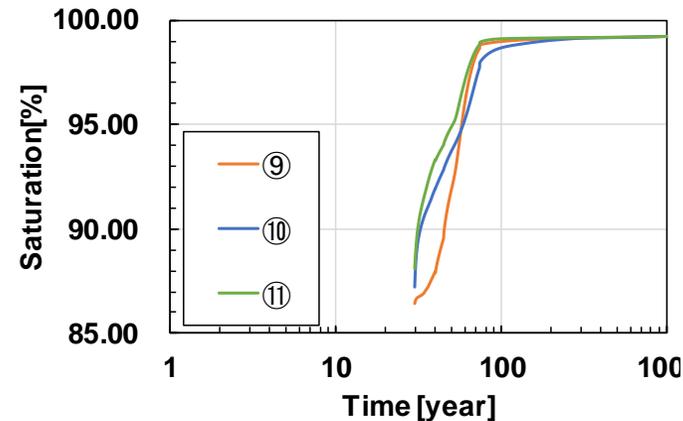
- 施設内の圧力分布計測も、格子状に光ファイバセンサーを設置する必要はない
- 不均質な地下水浸潤を考慮しない解析でも、側部低透水層では、場所によって飽和度、全応力の経時変化に差異が見られることを考慮して、設置間隔を検討
- 圧力分布計測用の光ファイバセンサーは、ひび割れ計測用のそれと構造が異なるため、合理的な設置には課題がある



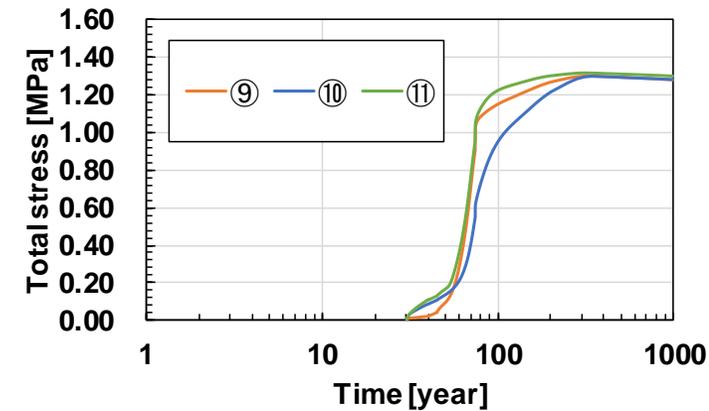
施設内圧力分布計測用光ファイバセンサ設置例

側部(側面図) 1面当たり4~5測線程度(間隔2,000mm)

空洞縦断方向0.6km



飽和度



全応力

3.3 地下空洞型処分調査技術高度化開発 (1/5)

目的: 大規模な坑道や地下空洞型処分施設などを建設する上で必要となる、岩盤にかかる初期地圧の三次元的な分布を測定する技術の開発等、地下環境を把握するための技術整備を行うと共に、最適な施設設計を支援するための技術整備を行う。

(1) 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

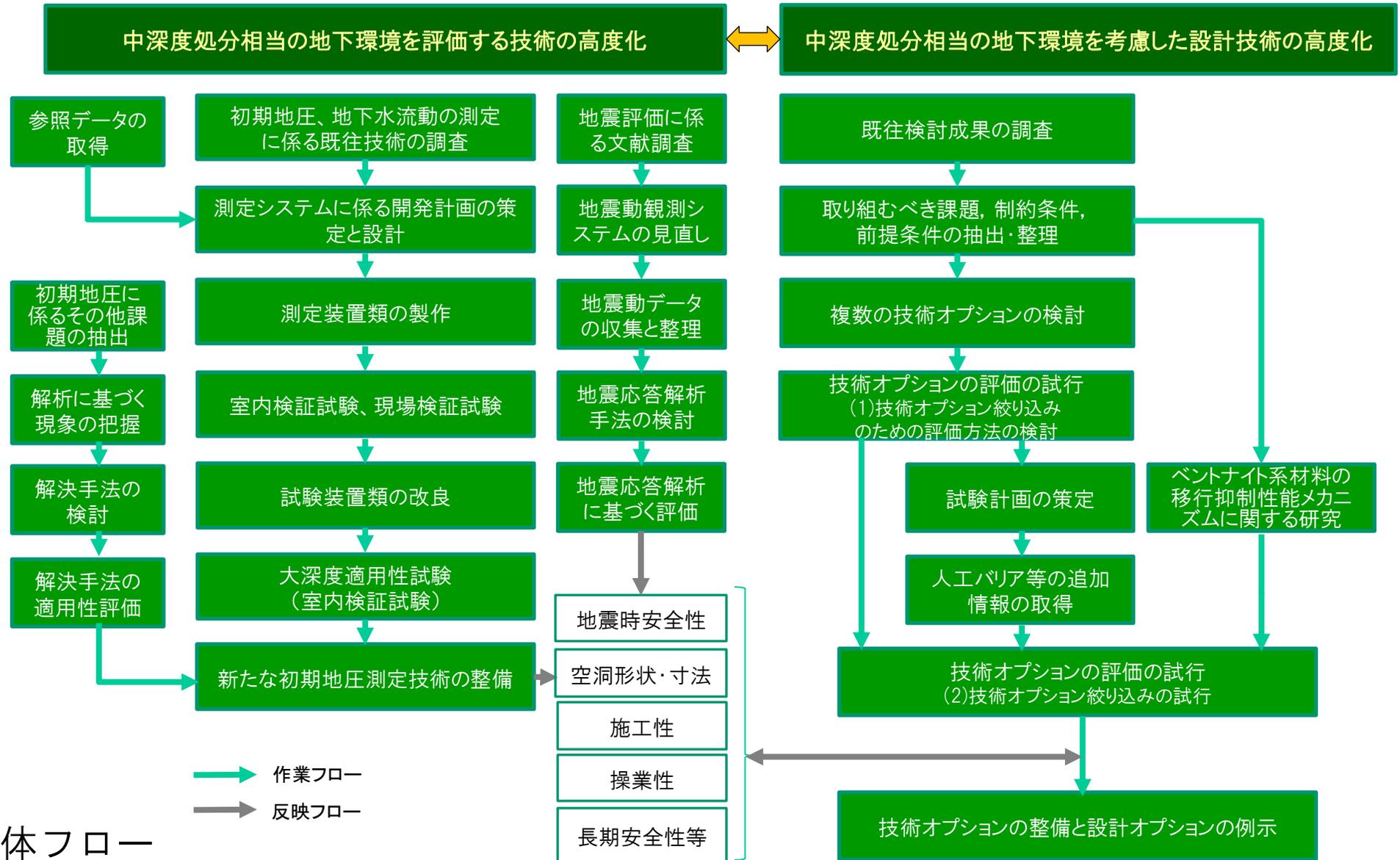
堆積軟岩を対象として、鉛直ボーリングにより、応力解放法により3次元初期地圧を測定できる装置の試作・実証を行う。また、堆積軟岩中に掘削される大空洞を考慮した、地下水流動場の測定・解析技術について調査・整備する。さらに、地震時における中深度処分施設の空洞並びに施設挙動を精度高く解析することが可能な技術を整備する。

(2) 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

複数の技術オプションに関する基礎情報を整備するとともに、技術オプションの選択やそれらを組み合わせた処分システム(設計オプション)の絞り込み手法を開発する。また、中性子イメージング装置等を利用し、ベントナイト系材料の透水メカニズムに関係する物性を測定し、施設設計の合理化や長期性能に対する説明性向上のための基礎情報を整備する。

実施場所: 日本原燃(株)の試験空洞内 他

3.3 地下空洞型処分調査技術高度化開発 (2/5)



開発計画の全体フロー

3.3 地下空洞型処分調査技術高度化開発 (3/5)

● 原環センター
● 東電設計

開発スケジュール

| 開発項目等 | | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 令和6年度 | |
|------------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|-------------|
| 1. 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化 | 既往技術の調査 | ● | ● | | | | |
| | 測定装置の開発 | 測定装置概念設計 | 基本設計 | 詳細設計/製作 | 室内検証試験 | 現場検証試験 ● | |
| | 参照データの取得 | ● | ● | | | | |
| | 初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討 | 技術課題の抽出 解析手法の選定 | 測定装置仕様の検討 解析手法の妥当性検証 | 測定装置仕様の検討 室内検証試験解析 | 岩盤状態の評価 現場検証試験解析 | 測定装置の適用性評価 適用限界等の検討 ● | |
| | 地下水流動評価技術の調査 | 既往データ/技術調査 | 評価手法の整備 | 技術課題の整理 | | | |
| | 地震動観測及び地震時影響評価技術の検討 | 計測計画 | | 計器設置(地上、地下) | 計測・メンテナンス | | 計器撤去 ● |
| | | 解析手法検討(文献) | | 地震応答解析手法の検討 | | | 地震応答解析・評価 ● |
| 2. 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化 | 既往検討成果の調査 | ● | ● | | | | |
| | 取り組むべき課題、制約条件、前提条件の抽出・整理と全体計画の策定 | ● | ● | | | | |
| | 技術オプションの検討 | オプション候補選定 | 課題抽出 | オプション提示 | オプション評価 | 最適化手法の整備 ● | |
| | ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究 | 既往文献調査/ 基礎データ取得 | 基礎データ取得 | 基礎データ取得 | 基礎データ取得 | 移行抑制機構の評価 ● | |

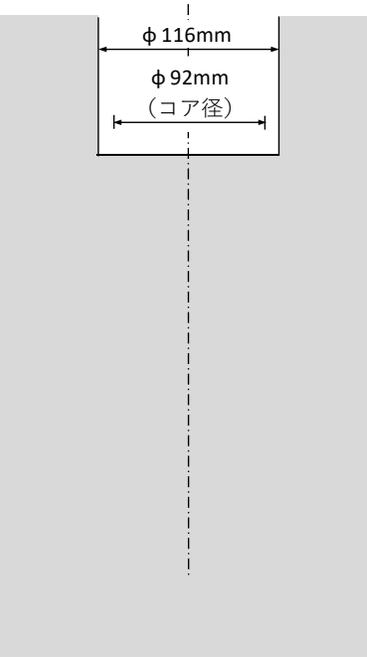
[← 人工バリア及び地下施設の概念設計と予備的な性能評価 ⇒]
[← モンモリロナイト密度・含水比をパラメータに、透水性や水分分布データを取得 ⇒]

3.3 地下空洞型処分調査技術高度化開発 (4/5)

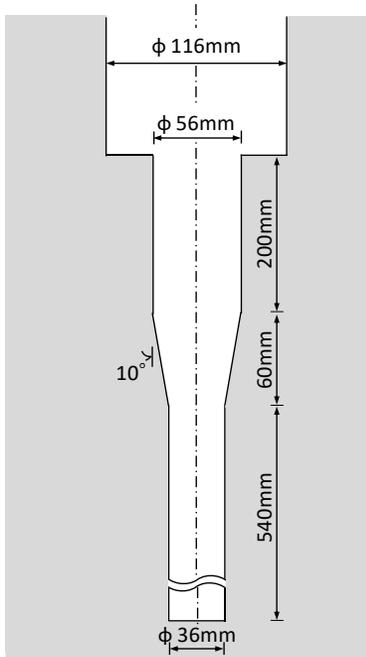
□ 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

堆積軟岩を対象に鉛直孔(深度-200メートル程度まで)で3次元初期地圧を測定することを目的として、応力解放法の一つである孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法を応用して、課題解決を目指す。この新たな応力測定方法を「**円錐孔壁ひずみ法**」と称する。現在、測定装置の基本設計を取り纏めた段階。

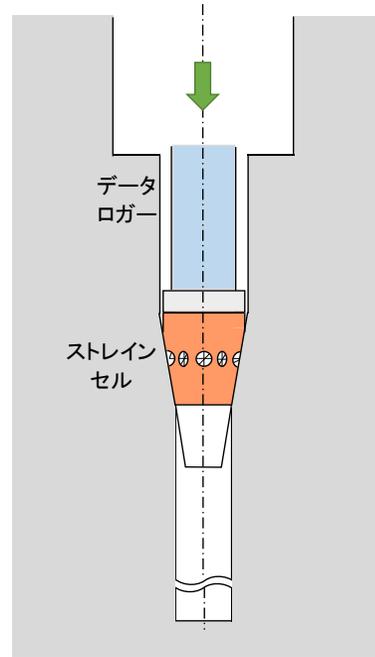
① 測定深度以浅までの掘削



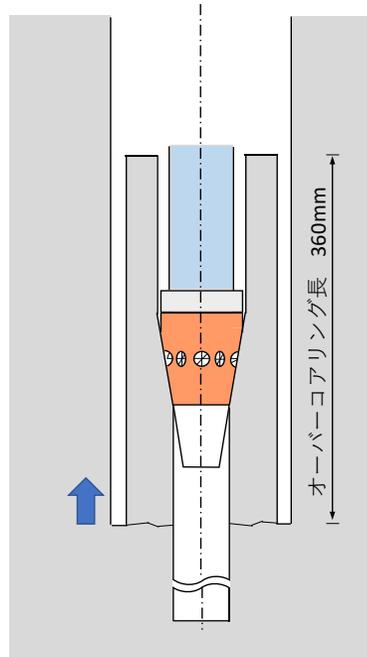
② パイロットボーリング、
孔底整形



③ ひずみ計設置

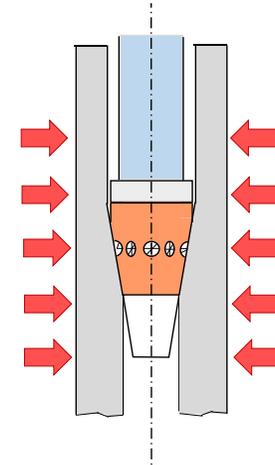


④ オーバーコアリング、
コア回収



⑤ 感度試験

回収コアの全周から圧力をかけてひずみを測定し、ひずみ感度を求める。



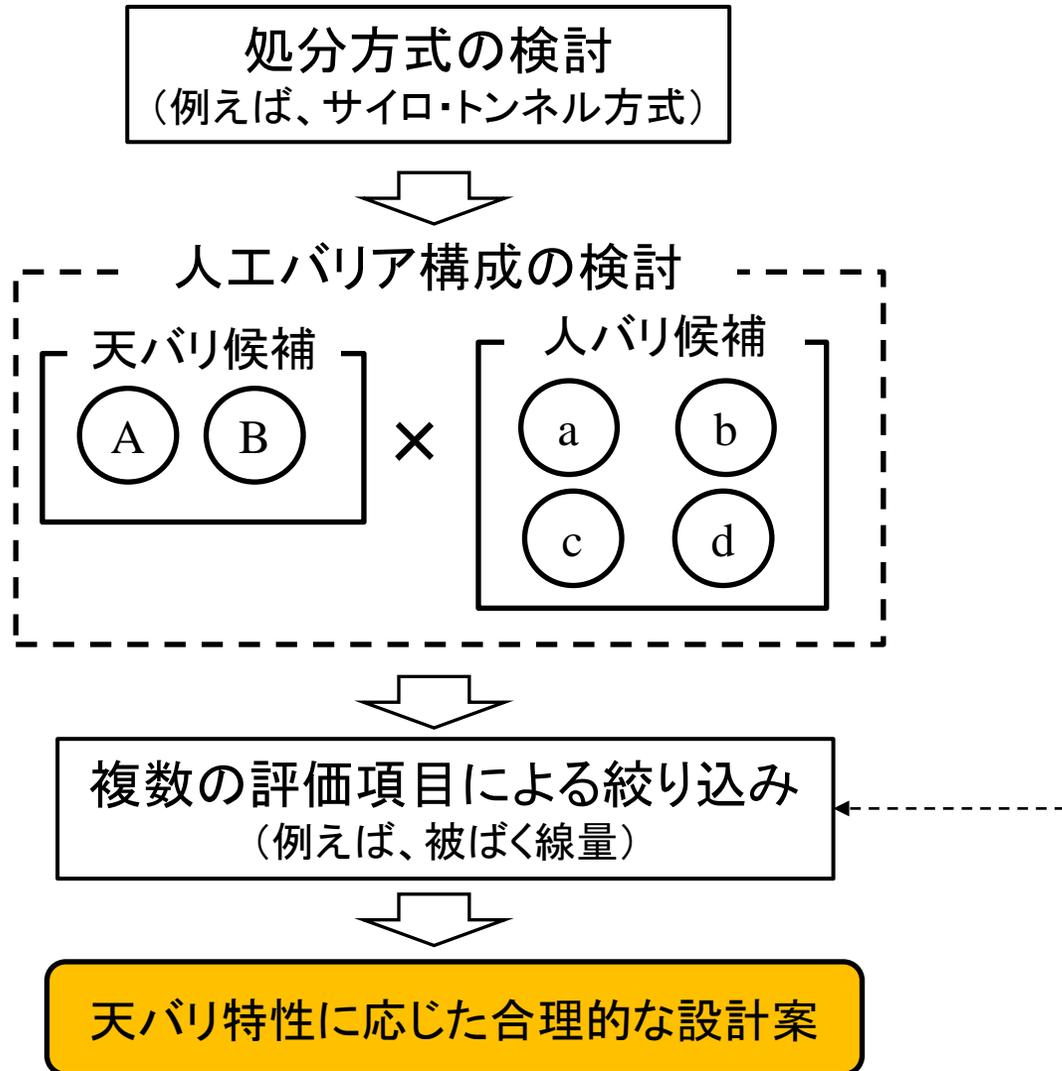
円錐孔壁ひずみ法の測定の流れ

[技術課題の検討]

- ① 孔形状及びひずみ計の最適配置の検討
- ② 接着方法及び接着剤の検討
- ③ 接着方法及び接着剤の検討のための基礎試験
- ④ 接着方法及び接着剤の検討のための岩石ブロックを利用した試験
- ⑤ ストレインセルの検討
- ⑥ データロガーの検討
- ⑦ 掘削ツールの検討
- ⑧ 孔内状況確認方法の検討
- ⑨ 感度試験方法の検討

3.3 地下空洞型処分調査技術高度化開発 (5/5)

□ 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化



| 評価項目の例 | |
|-----------|------------------------------|
| 大項目 | 小項目 |
| 設計の実現性 | 適用する建設・操業に係る技術の詳細設計への具体化の見通し |
| 建設・操業性 | 適用技術・導入装置の複雑さ |
| | 建設・操業期間中の地下構造物の管理の容易性 |
| | 放射線管理区域での作業性 |
| | 事故発生時における全ての場所へのアクセス性 |
| 閉鎖後長期の安全性 | 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ |
| | 自然事象シナリオを対象とした長期安全性 |
| 閉鎖前の安全性 | 品質保証・品質管理のし易さ |
| | 閉鎖前安全性の予測性 |
| 環境保全 | 周辺環境への影響の予測性 |
| 回収可能性 | 回収の容易性 |
| 費用・経済性 | 建設段階に必要な費用 |
| | 操業段階に必要な費用 |
| | 閉鎖段階に必要な費用 |

- 中深度処分について、これまで、試験空洞等を活用し、約15年に渡って基盤技術の研究開発を推進してきた。
- 今後も、中深度処分の円滑な実施に向け、必要な研究開発を継続していく。



研究施設等廃棄物処分の基本的な考え方と 処分技術の開発状況

*Basic Concept and Technical Development Status for Near
Surface Disposal of LLW Generated from Research, Industrial
and Medical Facilities, etc.*

令和4年5月17日

日本原子力研究開発機構バックエンド統括本部 埋設事業センター
Japan Atomic Energy Agency

坂井 章浩
Akihiro Sakai



- 研究施設等廃棄物の埋設事業について
Disposal project of LLW generated from research, industrial and medical facilities
- 埋設施設の概念設計について
Conceptual design of disposal facilities
- 立地基準の検討
Development of siting criteria
- 今後の検討について
Future works



研究施設等廃棄物の埋設事業について

*Disposal project of LLW generated from
research, industrial and medical facilities*

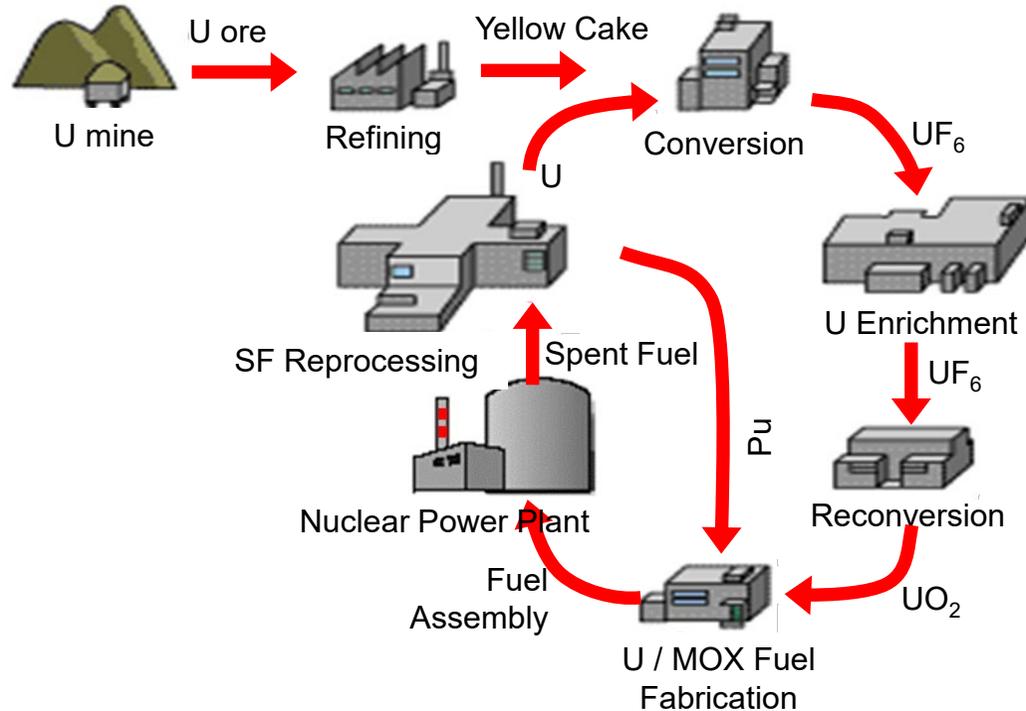


放射性廃棄物の発生

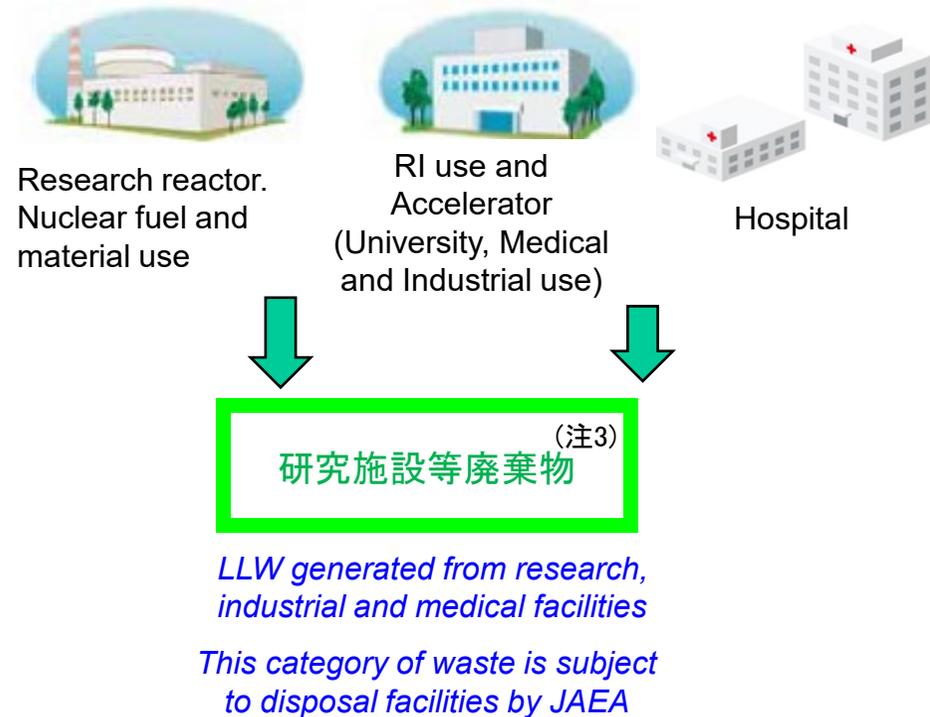
Nuclear and RI facilities where low level waste is generated

- 放射性廃棄物は、原子力発電所や、再処理施設、ウラン濃縮施設などの核燃料サイクル施設、医療機関や研究機関の運転や解体に伴って発生します。

Nuclear Fuel Cycle



Out of Nuclear Fuel Cycle

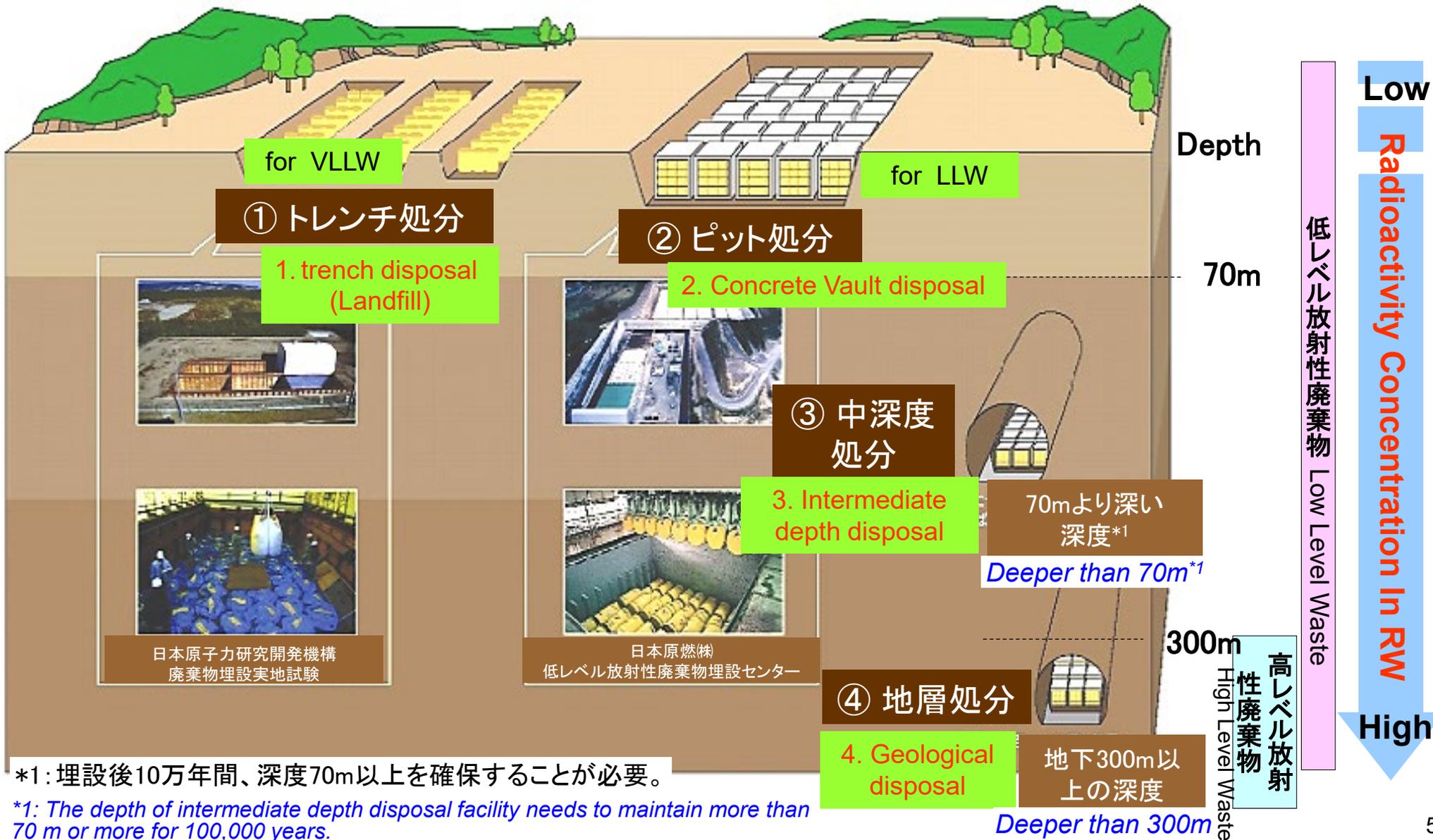


(注3) JAEAの再処理施設から発生するTRU廃棄物、燃料加工施設から発生するウラン廃棄物を含む区分



国内における放射性廃棄物の処分概念

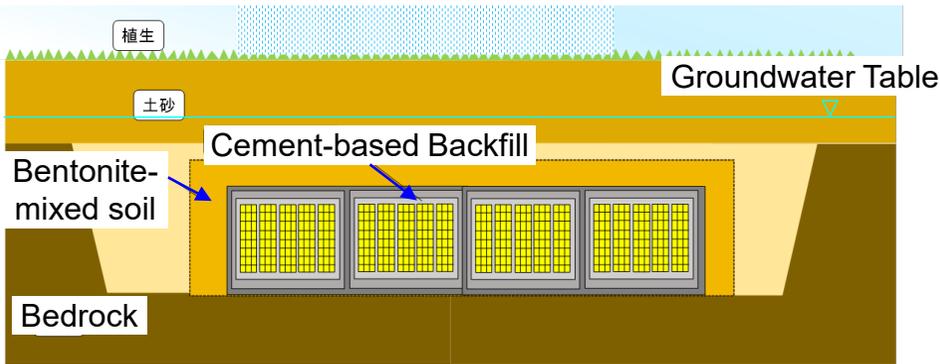
Disposal Concept of Radioactive Waste in Japan





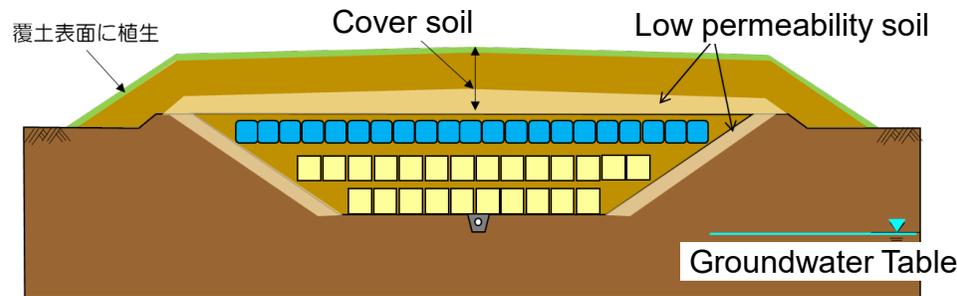
Concept of Ensuring Safety for Concrete Vault Disposal and Trench Disposal

ピット処分 Concrete Vaults for LLW



- コンクリートピットや水を通しにくいベントナイト混合土によって、放射性物質を閉じ込める。
Radioactive materials are confined in the disposal facility by concrete vaults and bentonite-mixed soil.
- 放射能は時間とともに減衰し、将来、コンクリートピットの機能が低下した場合でも、周辺土壌等によって、放射性物質の生活環境への移行が抑えられ、安全性が確保される。
Radioactivity will reduce with the passage of time, and even if the function of the concrete vaults declines in the future, the surrounding soil, etc. will reduce the transfer of radioactive materials to the biosphere.

トレンチ処分 Trench disposal facilities for VLLW (Landfill)



- 埋設施設の覆土後、約300年間、埋設地の管理を行う。
The disposal site will be controlled for about 300 years after installation of cover soil over the disposal facility.
- トレンチ埋設対象の放射性廃棄物は、放射能レベルが極めて低く、周辺土壌によって、放射性物質の生活環境への移行が十分抑えられる。
Radioactivity of the waste subject to trench disposal is very low level, and radioactive materials is sufficiently restrained from transferring to biosphere by the surrounding soil, etc.
- 透水性の小さい土壌等で埋設施設を覆うことにより、放射性廃棄物に接触する水の浸入等がより抑えられ、安全性が確保される。
The infiltration water into trench is reduced by low permeability cover soil.
- 埋設施設の覆土後、約50年間、埋設地の管理を行う。
The disposal site will be controlled for about 50 years after installation of cover soil over the disposal facility.



Background of JAEA's Disposal Project of LLW

LLW is generated from the nuclear energy research / medical and industrial use of radioisotopes



Research Reactor



Post-Irradiation Examination



Experiments with RI in fume hood



Cancer Screening

2,400 different sources in Japan



Current status

- These radioactive waste (RW) is still accumulating
- Total amount of waste : 660,000 drums(200-liter drum equiv. $1.32 \times 10^5 \text{m}^3$) since the 1950s.
- RW possessed by JAEA occupies 56% of these RW.
- The issues will affect operation of R&D facility.



Many wastes have been stored in storage facilities.



Aged facilities cannot be decommissioned.

Early implementation of the disposal is demanded in order to promote nuclear R&D and radioisotope utilization.

JAEA has been assigned an implementing organization for the disposal since 2008.



Outline of JAEA disposal project

■ 埋設施設の種類

Types of disposal facilities

ピット処分及びトレンチ処分施設

- ・ Concrete Vault
- ・ Trench disposal (Landfill)

■ 対象廃棄体物量評価結果 (平成30年度)

Amount of radioactive waste subject to disposal by JAEA

(Investigation result as of 2018)

: 約67万本 (200Lドラム缶)

Approximately 134,000 m³

(うち、原子力機構の廃棄体物量は約50万本)

including approximately 100,000m³ of JAEA

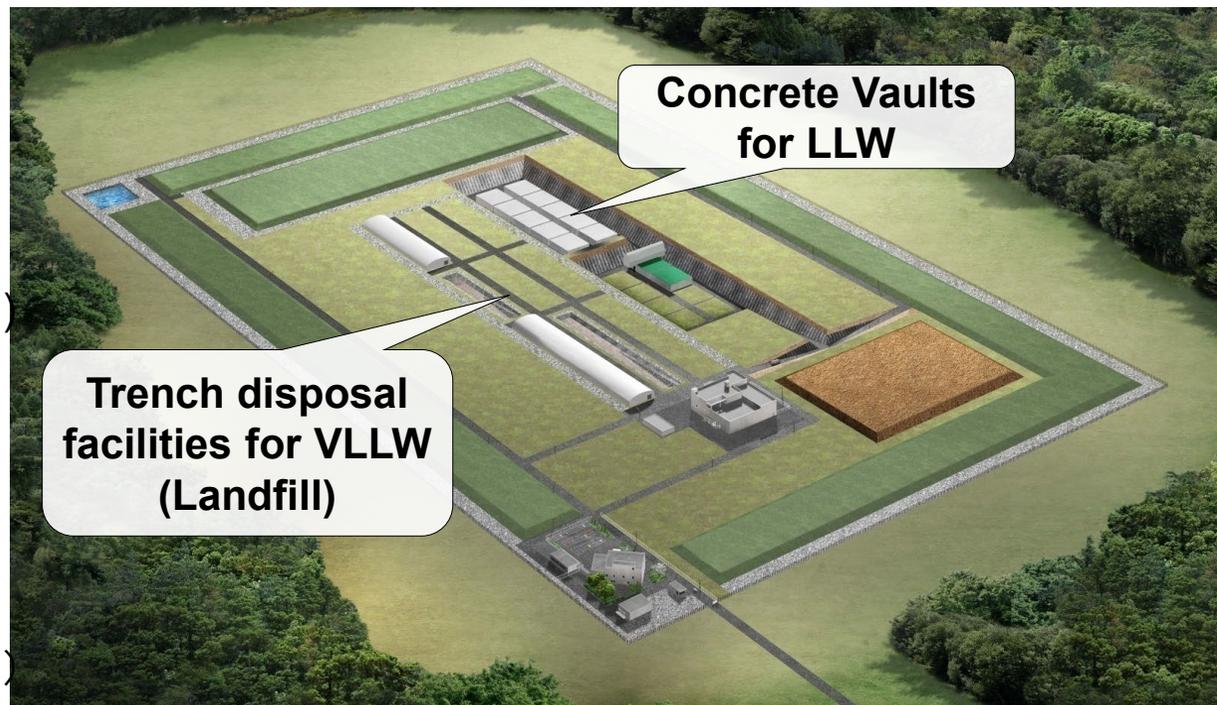
■ 埋設施設の規模 **75万本** (200Lドラム缶)

Capacity of Disposal Volume 150,000 m³

ピット処分対象 **22万本**、トレンチ処分対象 **53万本**

Disposal volume for Concrete Vaults : 44,000m³

for Trench Disposal : 106,000m³





研究施設等廃棄物の発生施設

Major Facilities where RW subject to JAEA disposal project is generated.

発生施設の種類(放射能インベントリに着目した分類)

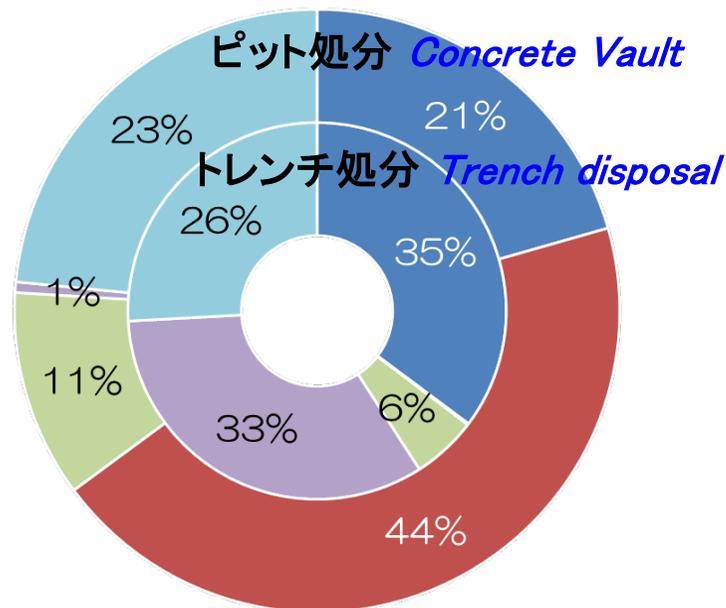
Categories of facility

| Categories | Major nuclear facilities |
|---|--|
| Research Reactors | Reactors possessed by JAEA (Fugen, Monju, JPDR, JRR-1, 2, 3, 3M, 4, NSRR, JMTR, HTTR, Joyo, Mutu (Nuclear power ship)), and other research reactors (東大炉、京大炉、近大炉、東京都市大炉、立教大炉、日立炉、東芝炉等) |
| Spent Fuel Reprocessing Plant | 分離精製工場、Pu転換技術開発施設(PCDF)、TVF等 |
| Post-Irradiation Examination (PIE) Facility | 燃料試験施設、ホットラボ、再処理特別研究棟、JMTRホットラボ、MMF、CPF等 |
| Uranium utilization facilities | 加工施設(Fabrication)、濃縮(Enrichment)、製錬(Smelting)、転換施設(Conversion)、実験施設(Examination) |
| Other facilities | RI utilization, Accelerators, Waste management facilities, etc. |

発生施設ごとの本数割合

(67万本*:平成30年度調査結果)

Estimated volume rate of RW generated from each category of facilities



- 原子炉施設 (Research Reactors)
- 再処理施設 (SF Reprocessing Facility)
- 照射後試験施設 (PIE Facilities)
- ウラン取扱施設 (Uranium Utilization Facilities)
- その他の施設 (Other Facilities; (RI使用施設、他 RI Utilization, others.))

* 埋設施設の規模は75万本。(ピット22万本、トレンチ53万本) 将来の物量の変動を考慮して、8万本の裕度を設定している。



Radioactivity Concentration of LLW Generated from Research Facilities, etc.

- ・ピット埋設対象の廃棄物の放射能濃度は発電所廃棄物と同程度で、時間の経過とともに減衰する。
- ・トレンチ埋設対象の廃棄物等には長半減期の核種も含まれるため、子孫核種によって数万年後の放射能濃度が若干増加するが、低い濃度を推移する。

廃棄物等の平均放射能濃度※1の経時変化

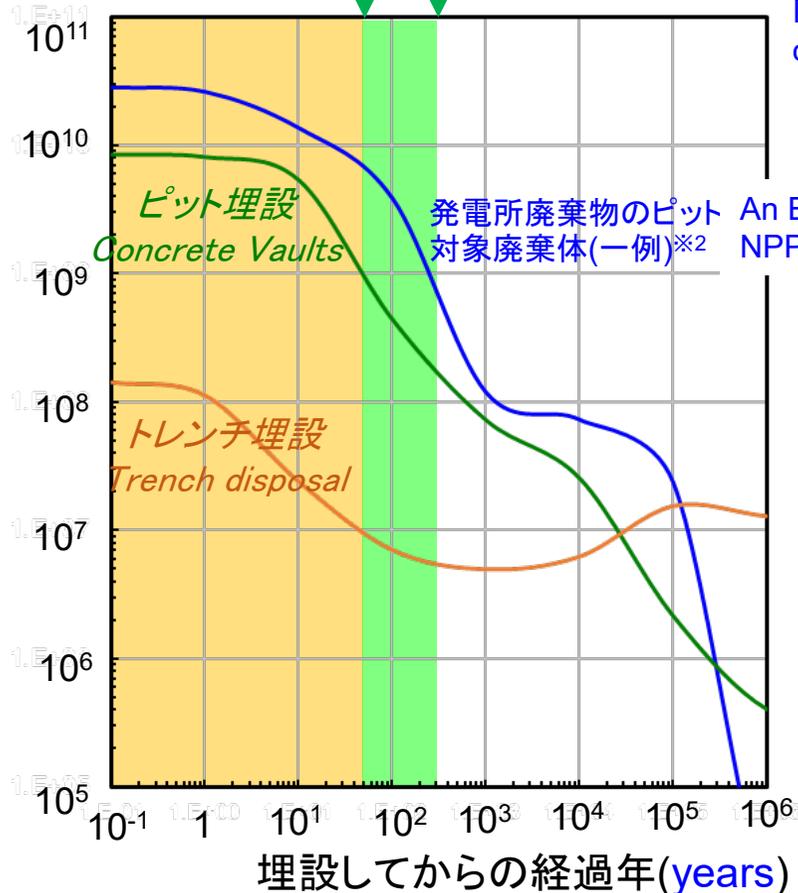
Change of average radioactive concentration of waste with the passage of time

Institutional control period for trench disposal (50 years*)

トレンチ埋設の管理期間(50年) ピット埋設の管理期間(300年)

Institutional control period for concrete vaults disposal (300 years)

廃棄物等の平均放射能濃度(Bq/t)
Average Radioactivity Concentration of RW



発電所廃棄物のピット埋設対象廃棄物(一例)※2 An Example: LLW from NPPs for Concrete Vaults

※1平成27年2月13日原子力機構の原子力規制庁との面談資料(ピット、トレンチ処分対象の研究施設等廃棄物における放射能インベントリについて)を基に、対象物量の増加分を見直して、作成。研究施設等廃棄物の放射能濃度は現時点の評価値であり、法規制を遵守しつつ今後精査していく。

※2日本原燃株式会社「六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設事業変更許可申請書」(平成9年1月)に記載された平均放射能濃度より作図



Radioactivity Concentration of LLW Generated from Research Facilities, etc.

廃棄物等の主要核種の平均放射能濃度※

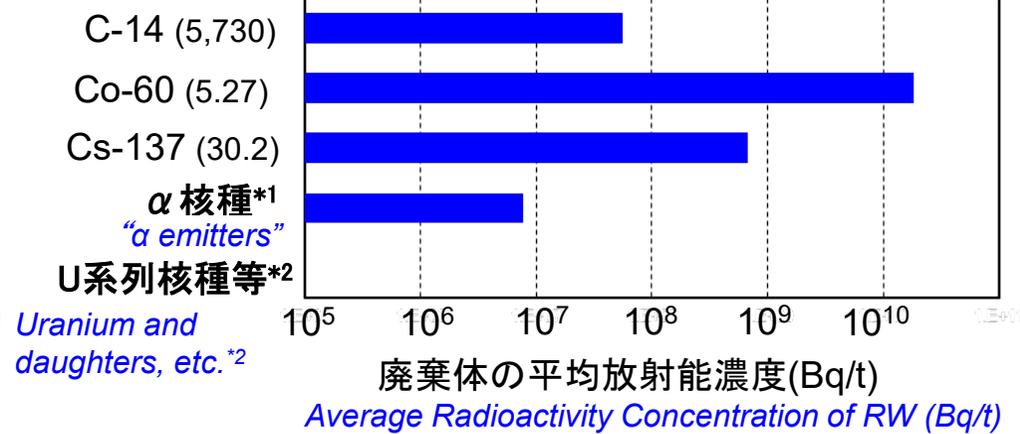
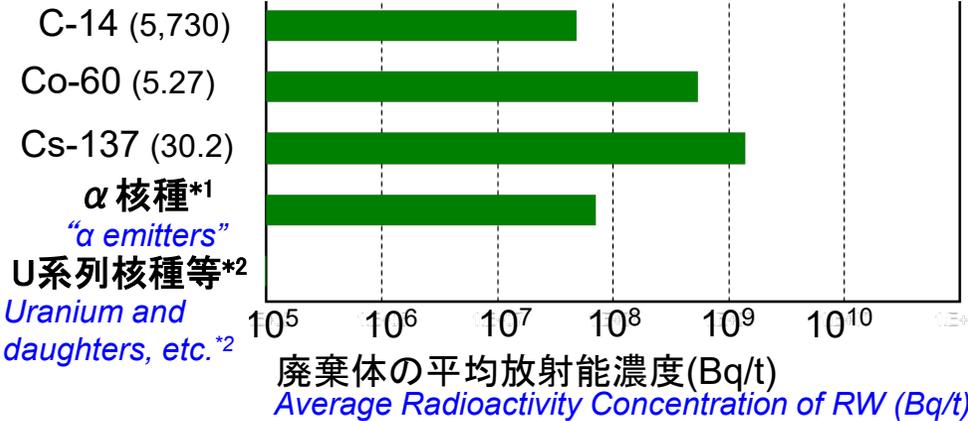
Nuclides (half life (y))

核種(半減期(年)) 研究施設等廃棄物のピット埋設対象

【参考】発電所廃棄物のピット埋設*3

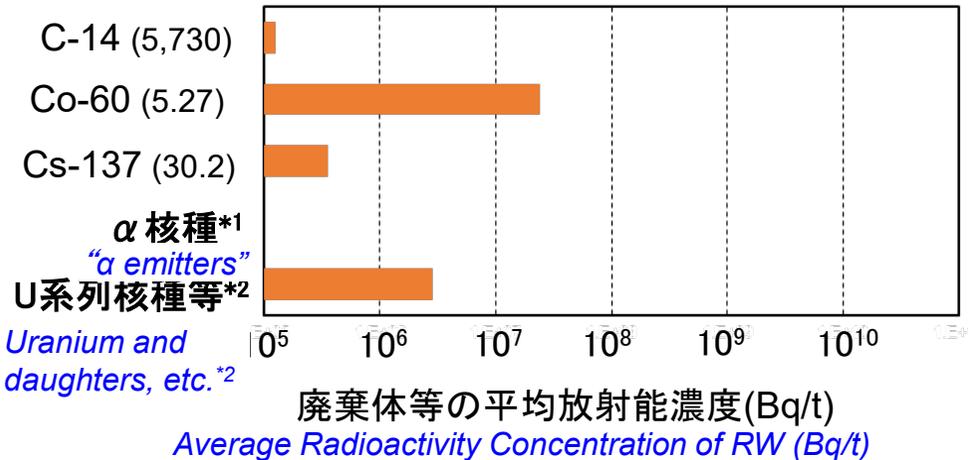
LLW from Research Facilities, etc. for Concrete Vault Disposal

An Example: LLW from NPPs for Concrete Vault Disposal



研究施設等廃棄物のトレンチ埋設対象

LLW from Research Facilities, etc. for Trench Disposal



・ピット埋設対象の廃棄物等は、再処理施設等の照射された核燃料物質を使用する施設からも発生するためCs-137やα核種*1の放射能濃度が高い特徴がある。

・トレンチ埋設対象の廃棄物等では、核燃料物質使用施設や加工施設からも発生するため、ウラン系列核種等*2が多く含まれる特徴がある。

※研究施設等廃棄物の放射能濃度は現時点の評価値であり、法規制を遵守しつつ今後精査していく。

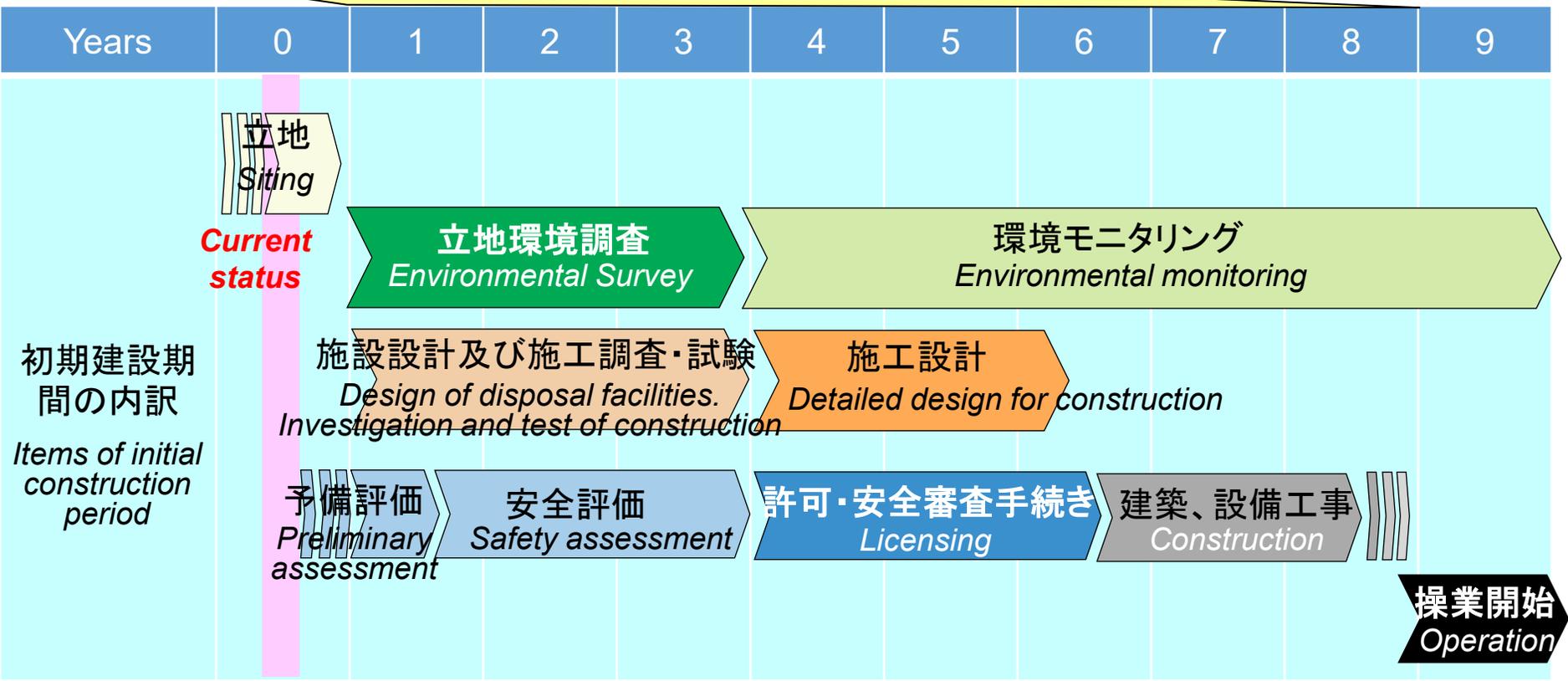
*3: 日本原燃株式会社「六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設事業変更許可申請書」(平成9年1月)に記載された平均放射能濃度より作図

*1: 主にPu-239、Am-241等

*2: U(U-238、U-235、U-234)、Th(Th-232)及び子孫核種



Basic Schedule of the Disposal Project

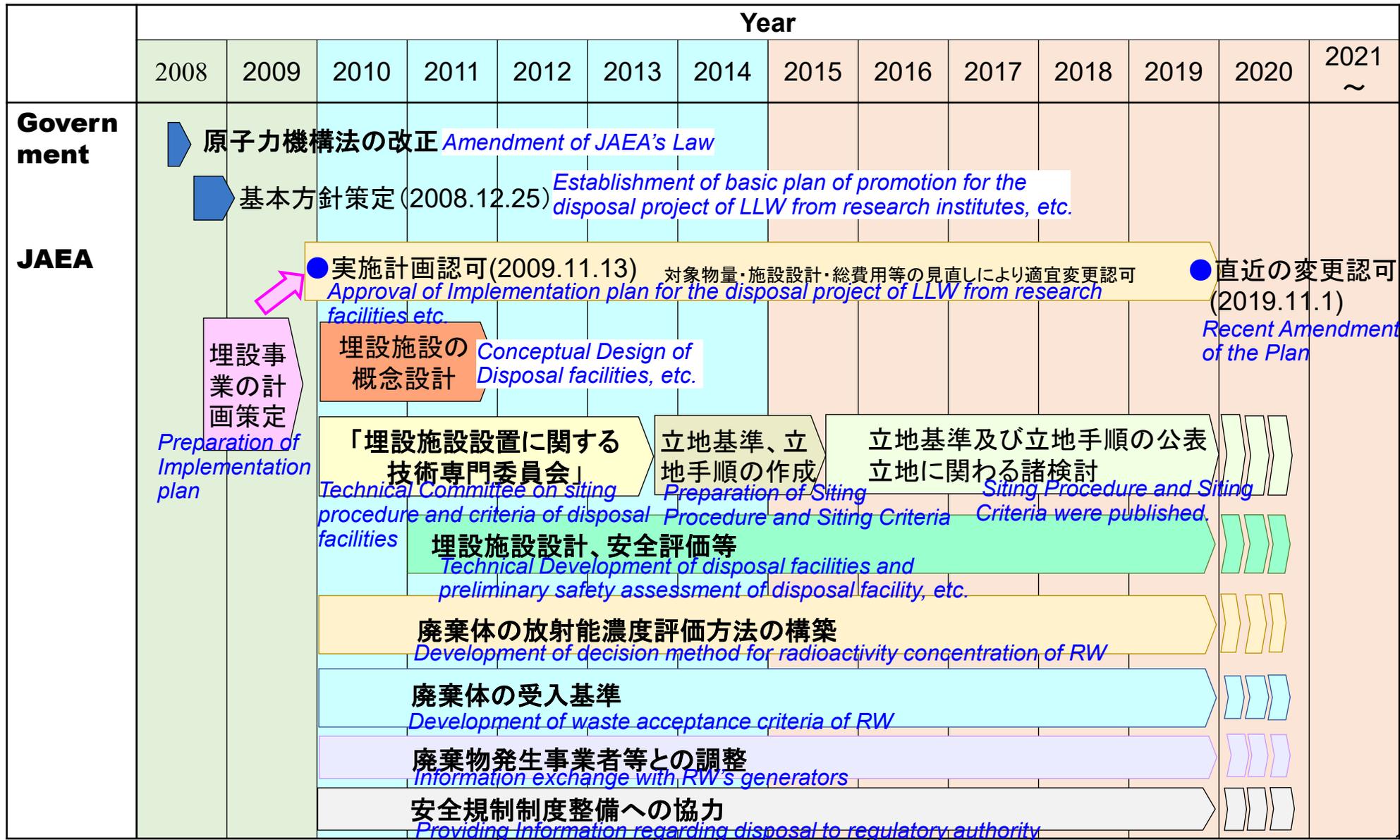


*1: Institutional control periods for concrete vaults and trench facilities after closure are about 300 and 50 years, respectively.



埋設事業のこれまでの実施概要

Status of JAEA Disposal project so far





埋設施設の概念設計について

Conceptual design of disposal facilities

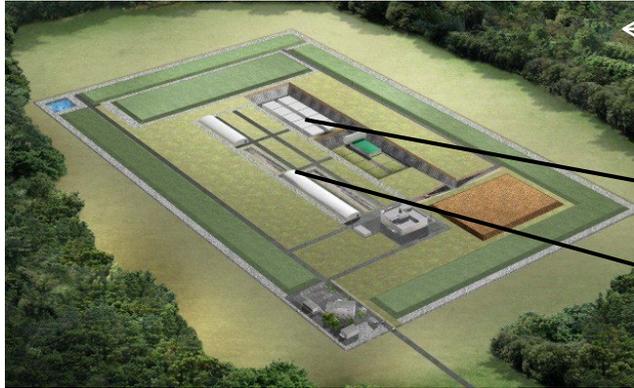


研究施設等廃棄物の埋設施設の概要

Conceptual Design of Disposal Facilities for LLW Generated from Research Facilities, etc.

敷地概念図

Conceptual Design of Disposal Site



敷地概念の鳥瞰図
Bird's eye view of disposal site



Concrete Vault for LLW

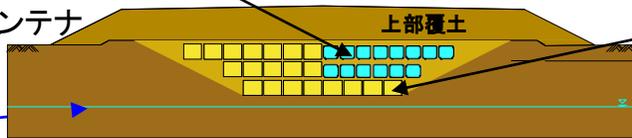
ピット処分対象 **22万本**
Disposal volume for Concrete Vaults : **44,000m³**

Trench facilities for VLLW

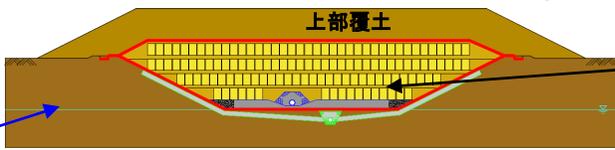
トレンチ処分対象 **53万本**
Disposal volume for Trench Disposal : **106,000m³**



フレキシブルコンテナ
Plastic Bags



トレンチ埋設施設 (安定型) Trench facility



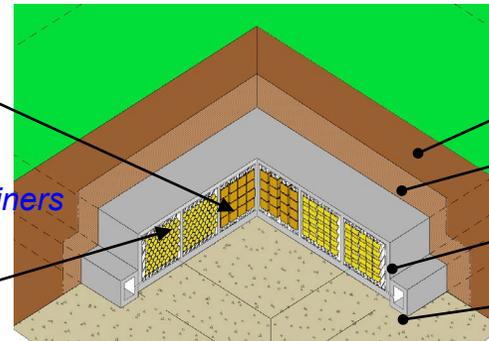
トレンチ埋設施設 (付加機能型)
Trench with prevention system from permeation and leakage of water



角形容器
Box type containers



200Lドラム缶
200 liter drums



コンクリートピット埋設施設
Concrete vault

上部覆土 Cover Soil

ベントナイト混合土
Bentonite-mixed Soil

コンクリートピット
Concrete Vault

岩盤
Bedrock

ピット処分施設の検討状況

Conceptual Design of Concrete Vaults

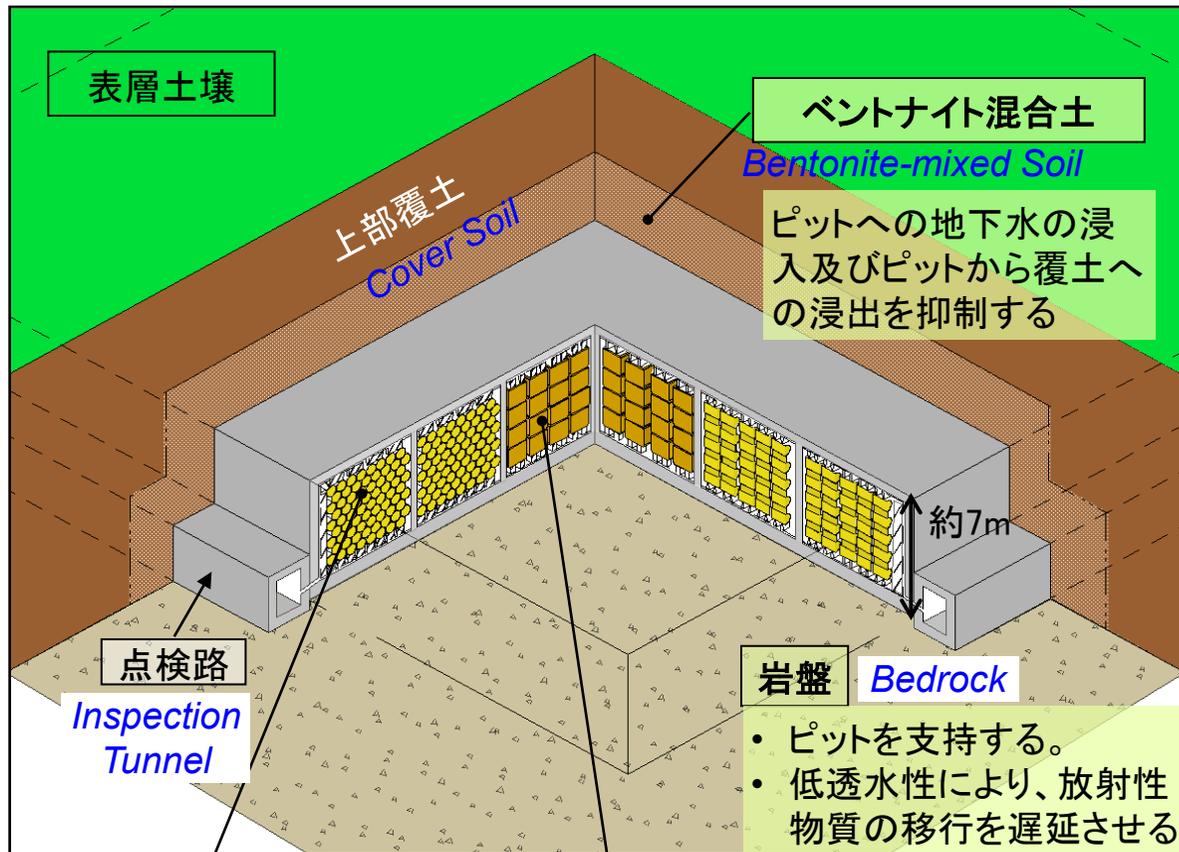


コンクリートピット
埋設施設: 18基

18 concrete vaults are
considered.

ピット処分 22万本

Disposal volume for
Concrete Vault Disposal :
approx. 44,000m³



日本原燃(株)のピット
Concrete vault facility
By JNFL Ltd.



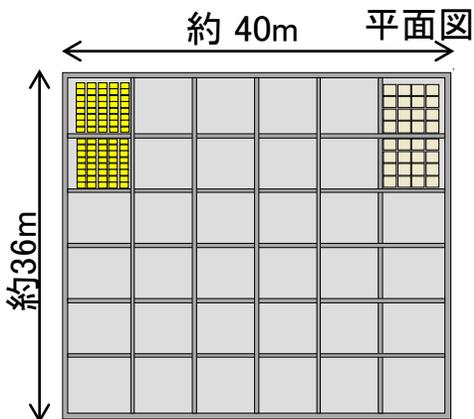
施設外観



ピット内の廃棄体の定置

発電所廃棄物のピット
処分は、青森県六ヶ所村において、日本原燃(株)により実施中。

約 40m 平面図



施設仕様は、立地条件・施設設計によって変わらうる。



ドラム缶に廃棄物を収納し
固型化した廃棄体

200 liter drums



角型容器に廃棄物を固
型化した廃棄体

Box type containers



タンク等の内部を固型化し
た廃棄体

Large Components

※写真は容器の例を示した。

Waste solidified with cement, etc. in a container



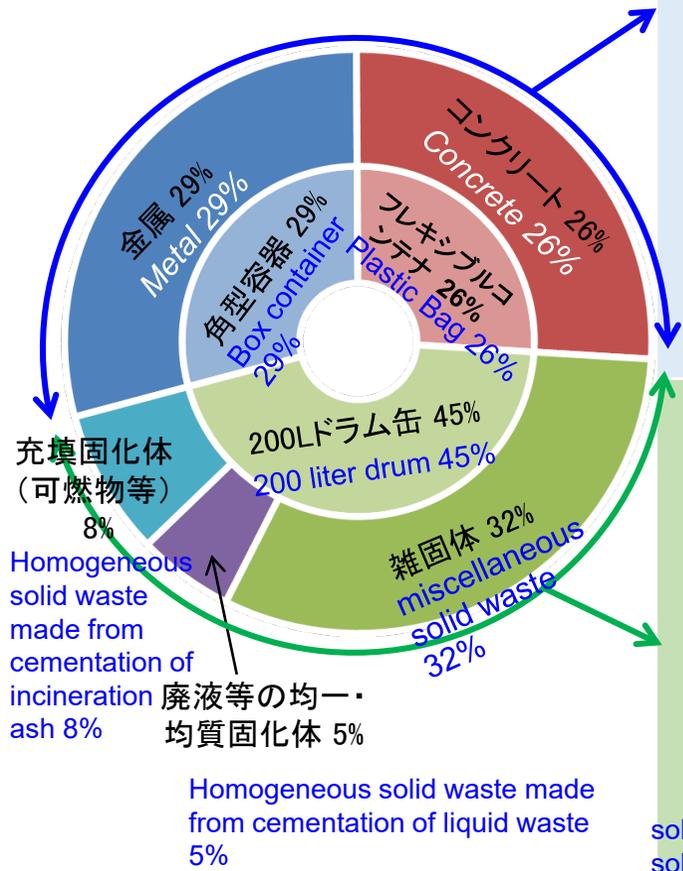
トレンチ処分場の設計概念

Concept for Types of Trench Disposal Facilities

トレンチ処分 53万本

Disposal volume for Trench

Disposal : approx. 106,000m³



概念設計

Conceptual Design of JAEA

トレンチ処分施設 Trench facility

金属等
(metal, etc.)

コンクリート等
(Concrete, etc.)

付加機能型トレンチ処分施設

Trench with prevention system from permeation and leakage of water

充填固化体等
solid waste made by solidifying waste with cement

均質・均一固化体
Homogeneous solid waste made from cementation of liquid waste, etc.

廃棄物処理法

Waste Disposal and Public Cleansing Law (for industrial and municipal waste)

産業廃棄物の安定型処分場

Landfill for stable industrial waste (Non leachate controlled type)

雨水等排水設備 展開検査場

地下水 えん堤 浸透水採取設備

安定五品目(*1)

Stable industrial waste

産業廃棄物の管理型処分場

Landfill for industrial waste (Leachate controlled type)

地下水 側溝 浸出液処理設備 調整池 覆土 廃棄物 えん堤 遮水工 地下水集排水設備 保有水等集排水設備

安定五品目及び特管物以外の廃棄物(*2)

Industrial waste other than stable waste and hazardous waste

(*1) 廃プラスチック類、ゴム屑、金属屑、ガラス屑、コンクリート屑及び陶磁器屑、がれき類
 (*2) 安定化及び無害化された特別管理産業廃棄物は処分対象に含まれる

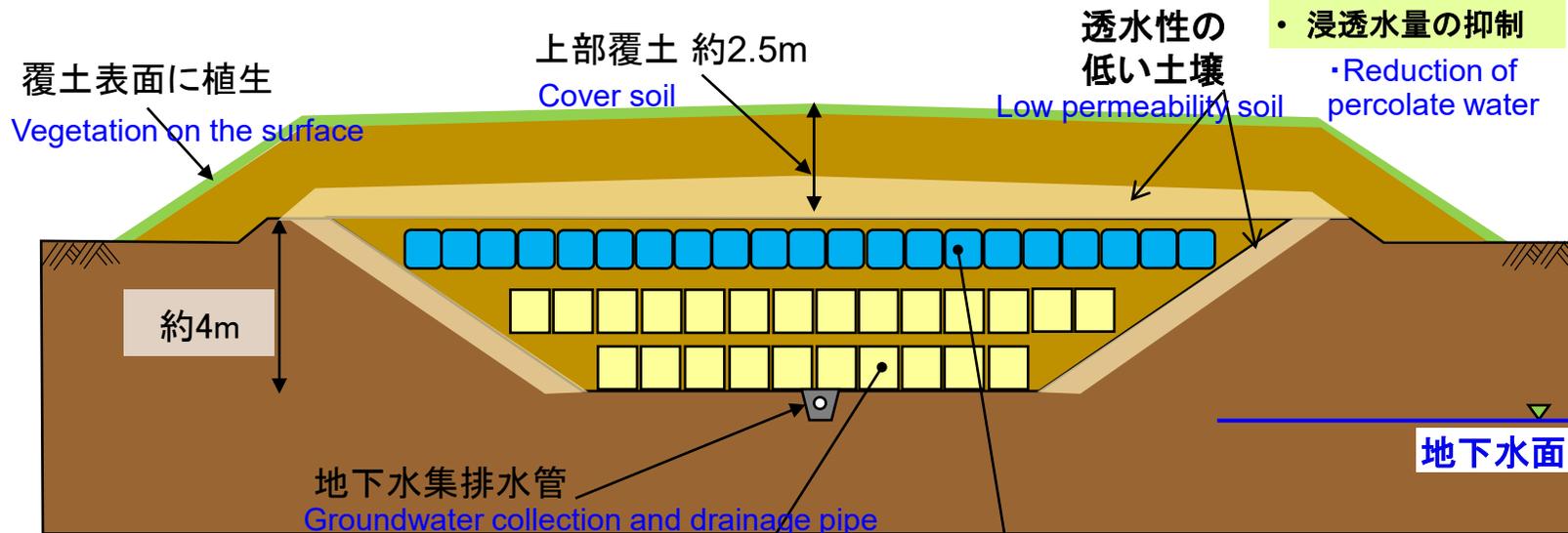
トレンチ処分施設の検討状況 (1)

Conceptual Design of Trench Disposal Facility (1)

トレンチ埋設施設 Trench Disposal Facility

コンクリートや金属など安定な性状の廃棄物(安定5品目)を埋設する。

Stable waste, such as concrete, metal, etc. is disposed of in the facility.



ドラム缶に廃棄物を収納し砂等を充填

200 liter drums



角型容器に金属類を収納し砂等を充填

Box type containers



フレキシブルコンテナ (コンクリートガラを収納)

Plastic Bags



有姿廃棄物(タンク等の内部)にセメントなどを充填

Large Components

原子力機構のトレンチ施設

Trench disposal facility By JAEA.



原子力機構では、茨城県東海村の原子力科学研究所の敷地において、試験研究炉の解体により発生したコンクリート廃棄物の埋設処分を実施中。



トレンチ処分施設の検討状況 (2)

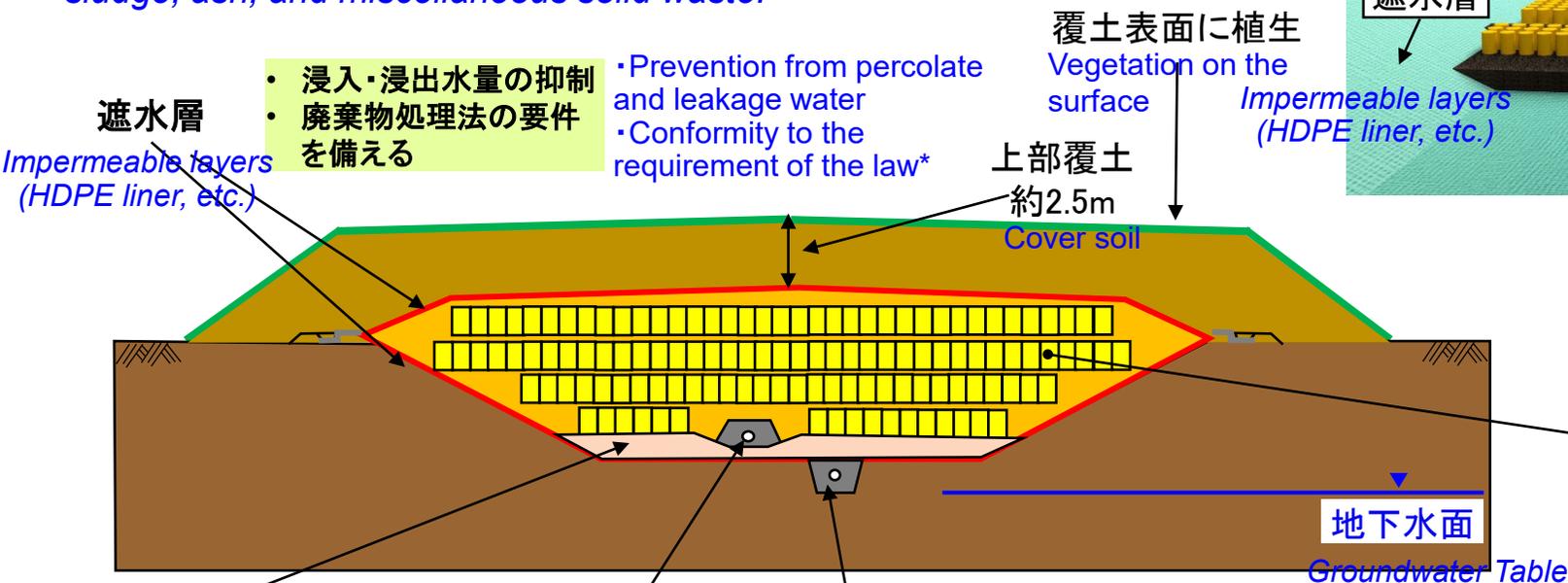
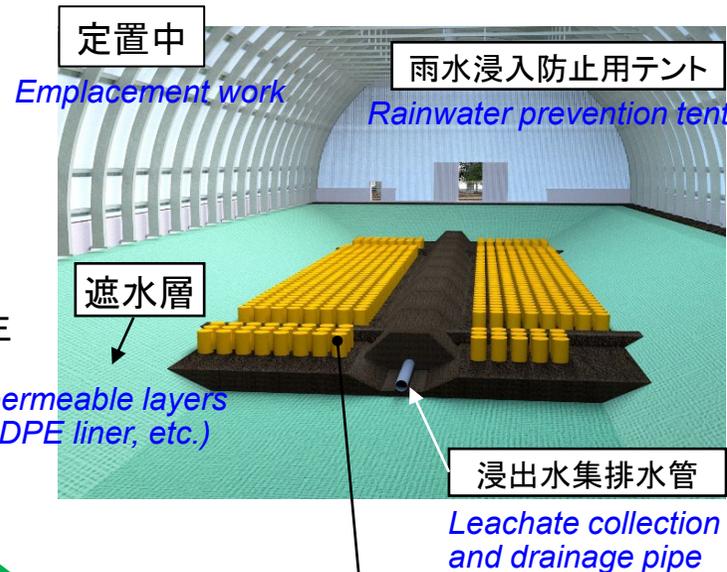
Conceptual Design of Trench Disposal Facility (2)

付加機能型トレンチ埋設施設

Trench with prevention system from permeation and leakage of water

性状の混在した廃棄物、焼却灰や廃液の固化体など、安定5品目以外の廃棄物を埋設する。

The facility is applied for solid waste made from cementation of liquid, sludge, ash, and miscellaneous solid waste.



- 浸入・浸出水量の抑制
- 廃棄物処理法の要件を備える

- Prevention from percolate and leakage water
- Conformity to the requirement of the law*

覆土表面に植生
Vegetation on the surface

上部覆土
約2.5m
Cover soil

Impermeable layers
(HDPE liner, etc.)

浸出水集排水管
Leachate collection and drainage pipe

地下水面
Groundwater Table



200 liter drums

保護層 Cover layer

- 遮水層の保護

• Protection of impermeable layer

浸出水集排水管
Leachate collection and drainage pipe

- 浸出水の集水
- 廃棄物処理法の要件を備える

• Collection and drainage of leachate
• conformity to the requirement of the law*

地下水集排水管
Groundwater collection and drainage pipe

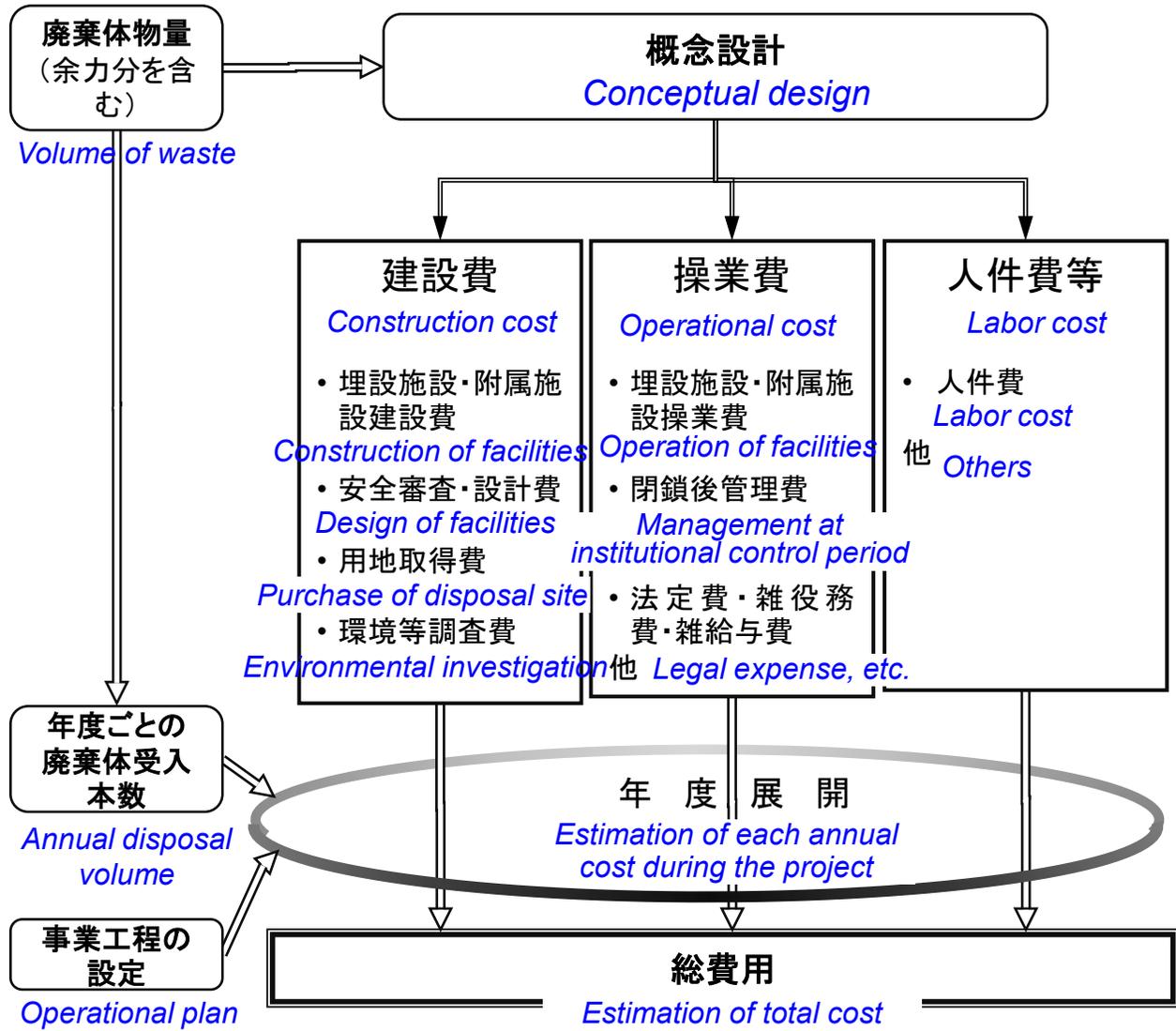
* Waste Disposal and Public Cleansing Law (for industrial and municipal waste)



埋設事業における総事業費の見積もり

Estimation of Total Cost of Disposal Project

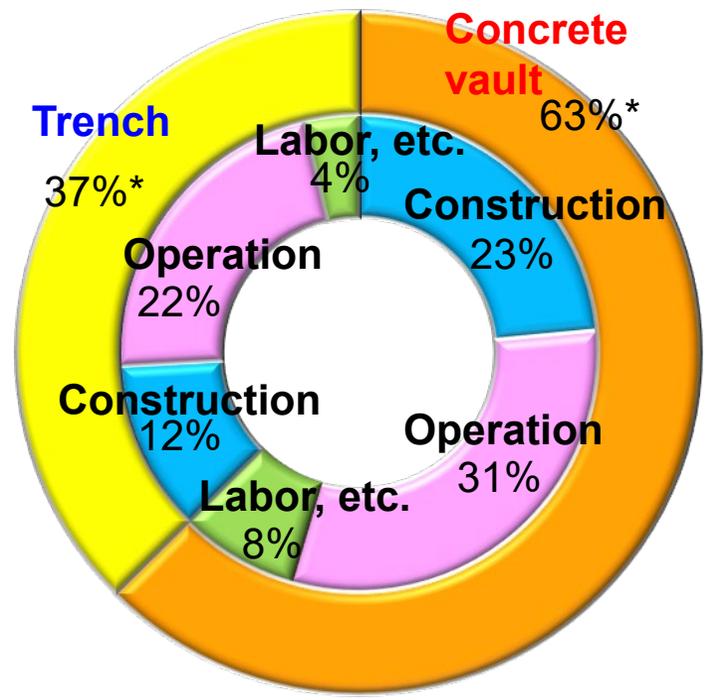
総費用の積算方法の概要 Estimation method of total cost



総費用の積算結果 Estimation result of total cost

2,243億円
¥ 224.3 billion Japanese yen

総費用の内訳 The ratio of each expense



* 各項目による割合の合計は、四捨五入により合わない場合がある



立地基準の検討

Development of Siting Criteria



立地手順と基準の検討経緯

Background of Development of Siting Procedure and Siting Criteria

埋設処分業務の実施に関する基本方針 *Policies of "Basic plan of promotion for the disposal project of LLW from research institutes, etc".*

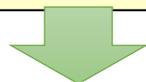
- 埋設施設の立地の選定については、手続きの透明性を確保し、公正な選定を行うことを基本とする。
- 原子力機構は、実施計画において、埋設施設の立地の選定に係る手順及び基準を明確に定め、当該手順等に沿って、埋設施設の立地の選定を行う。



埋設施設設置に関する技術専門委員会での検討 *Development of siting procedure and criteria of the disposal facilities on Technical Committee*

平成22年6月～平成25年11月 (May. 2010～November. 2013)

- 外部有識者等からなる当該委員会を設置し、埋設施設の立地の選定に係る手順及び基準に関する技術的事項の検討結果を取りまとめた。
- ※ 本取りまとめは、原子力機構が策定する立地手順及び基準に資するため、取りまとめ当時に考え得る種々の方策案と留意事項をまとめたもの。



文科省研究施設等廃棄物作業部会で立地手順及び基準案の審議 *Deliberation of siting procedure and criteria of the disposal facilities on Committee in MEXT**

- 技術専門委員会での取りまとめで提案された立地手順及び基準を踏まえるとともに、基準については、その後、許可基準規則及び同解釈で示された設計基準等を考慮



立地手順及び基準の公開 *Siting procedure and criteria of the disposal facilities were published on 2016*

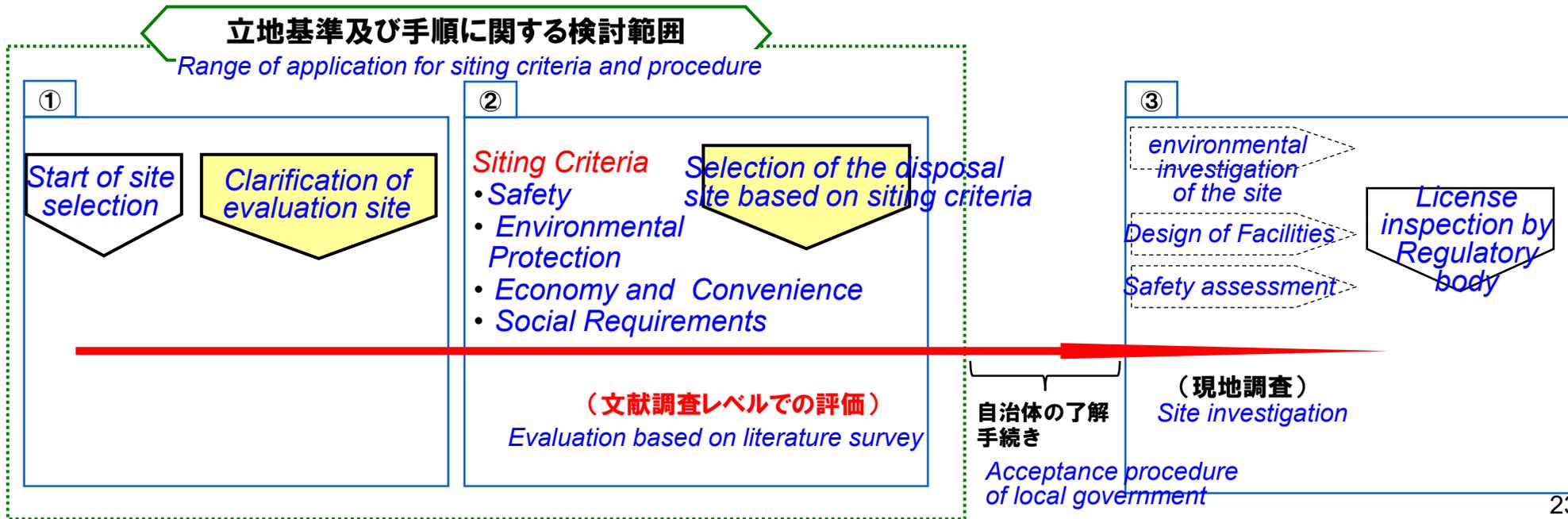
- 埋設施設の立地の選定に係る手順及び基準を記載した埋設事業の実施計画の変更認可(平成28年3月25日)
- 実施計画において詳細について別途定めることとした項目について策定して公開(平成28年6月13日)

*Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology that is the supervising organization of JAEA



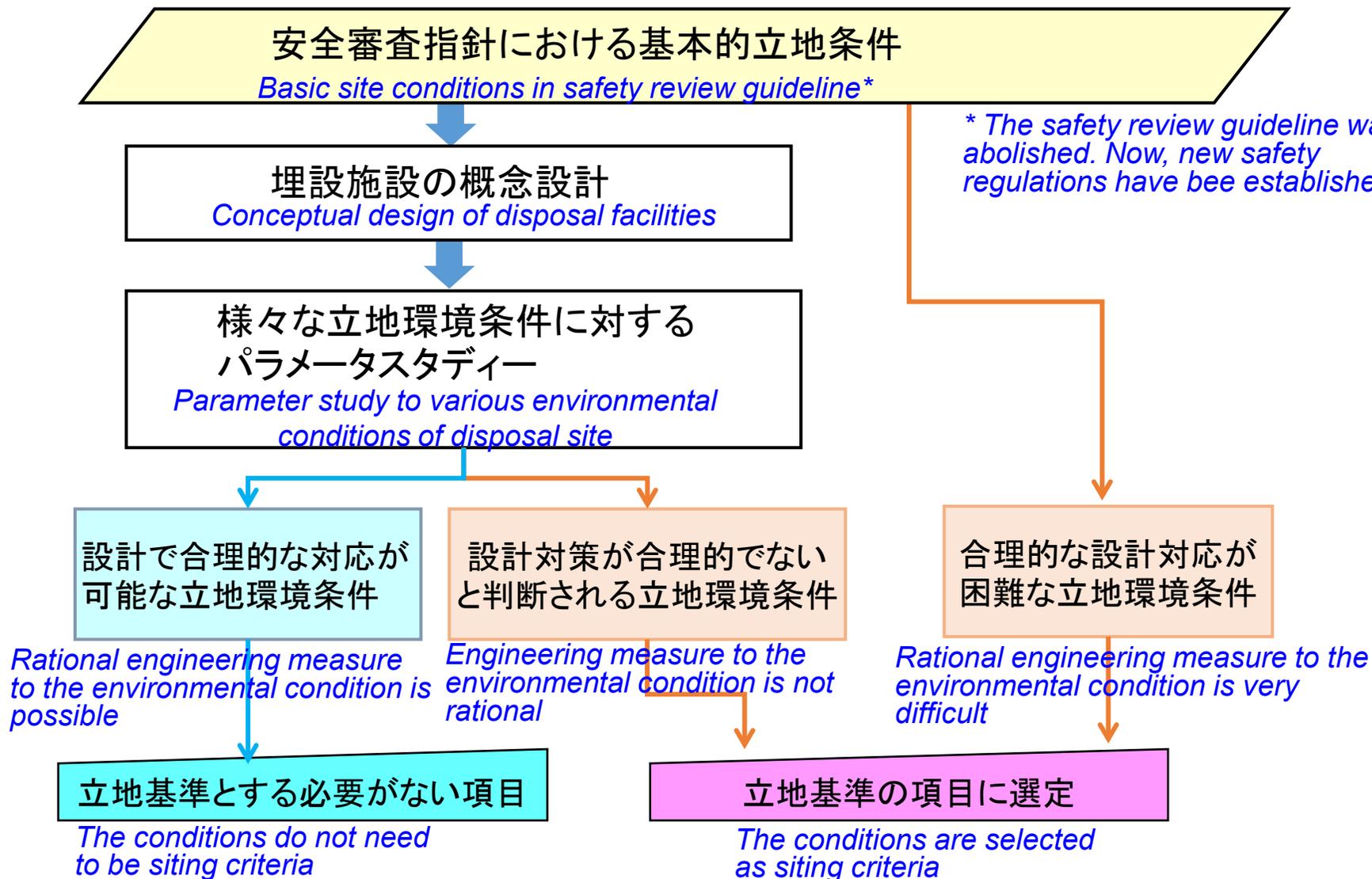
Development of Siting Criteria

- **立地基準項目の選定** (*Selection of items of siting criteria*)
 - **安全性(Safety):**
国内の安全規制の要件において、立地選定段階で避けるべき項目を立地基準項目とした。
 - **環境保全、経済性・利便性、社会的要件:**
Environmental protection, Economy / Convenience, Social requirements
国内外の類似施設の立地基準の事例に基づいて、立地基準項目を選定した。
- **埋設施設の操業に向けたプロセス** (*Process toward operation of disposal facilities*)





Flow Chart of Assessment of Siting Criteria regarding Safety





安全性に係る立地環境条件の区分

Categorization of Environmental Conditions on the Site regarding Safety

合理的な設計対応が困難な立地環境条件

Environmental conditions to which rational engineering measure is very difficult

- (1) 自然環境 (*Natural Environment*)
火山、津波、陥没、洪水、活断層
Volcanoes, tsunamis, depressions, floods, active faults
- (2) 社会環境 (*Social Environment*)
石炭、鉱石等の天然資源
Natural resources such as coal and ore

立地基準項目へ反映

Categorization into items of siting criteria

基本的立地条件*

*Basic site conditions in safety review guideline**

パラメータスタディの項目 *Items of the parameter study*

① 施設設計に係る項目 *Items regarding design of disposal facilities*

埋設施設の安全評価に影響を及ぼす項目 *Items that influence the safety assessment*

(1) 自然環境 *Natural environment*

地盤の透水係数、分配係数、地下水位の深度、地下水の動水勾配、降雨の浸透水量、帯水層の厚さ
hydraulic conductivity, distribution coefficient, groundwater level, hydraulic gradient, seepage water rate, aquifer thickness, etc.

河川等の流量、河川等までの距離 等

(2) 社会環境 *Social environment*

河川、地下水の飲用
農作物の栽培、畜産物の飼育、水産物の漁獲 等
Drinking river water and groundwater, cultivation of agricultural products, breeding of livestock products, fishing of marine products, etc.

② 敷地の整地等に係る項目 *Items regarding land leveling, etc.*

施設の建設費又は敷地の土工費等に影響を及ぼす項目
Items that influence costs for construction of facilities or for earthwork of the site, etc.

敷地の造成、地盤の地耐力、地下水位の深度、地すべり地形への対策工 等
Land levelling, ground bearing capacity, landslide topography countermeasures, etc.

* The safety review guideline was abolished. Now, new safety regulations have been established.



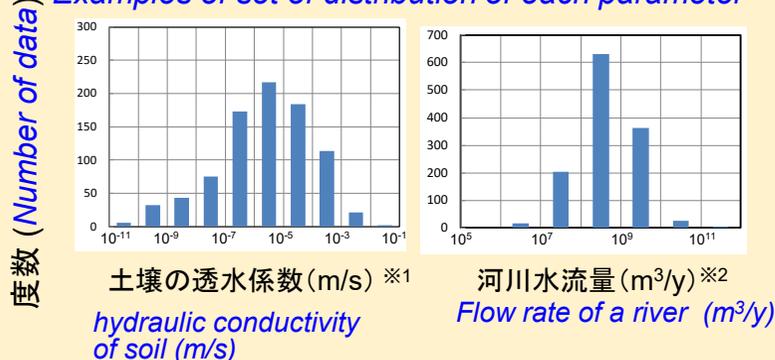
安全評価に係るパラメータスタディの評価結果

Evaluation Result of Parameter Study of Items that Influence the Safety Assessment

- パラメータの分布から評価値をランダムに組み合わせ、1,000通りの立地条件を設定し、線量を評価
1,000 site conditions were made by randomly choosing the values according to the probabilistic distribution of parameters. Then, doses were evaluated at the 1,000 site conditions.
- 1000通りの立地条件のうち97.5%が線量のめやす値(10 μ Sv/y)以下となることを確認
It was examined whether the evaluated doses at 97.5% of the 1000 site conditions were below the dose criteria (10 μ Sv / y)

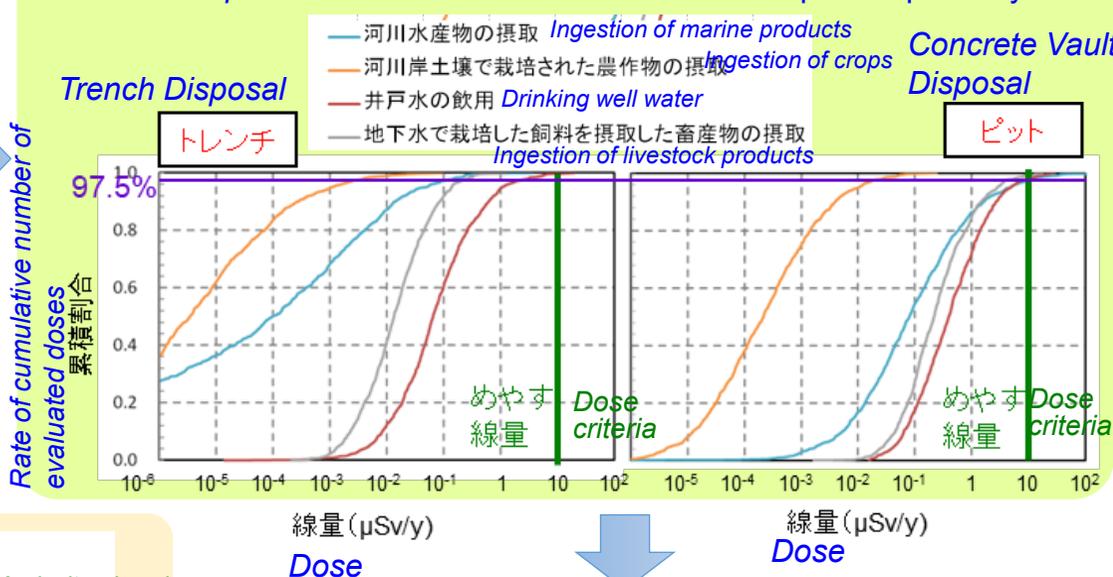
パラメータの分布の設定例

Examples of set of distribution of each parameter



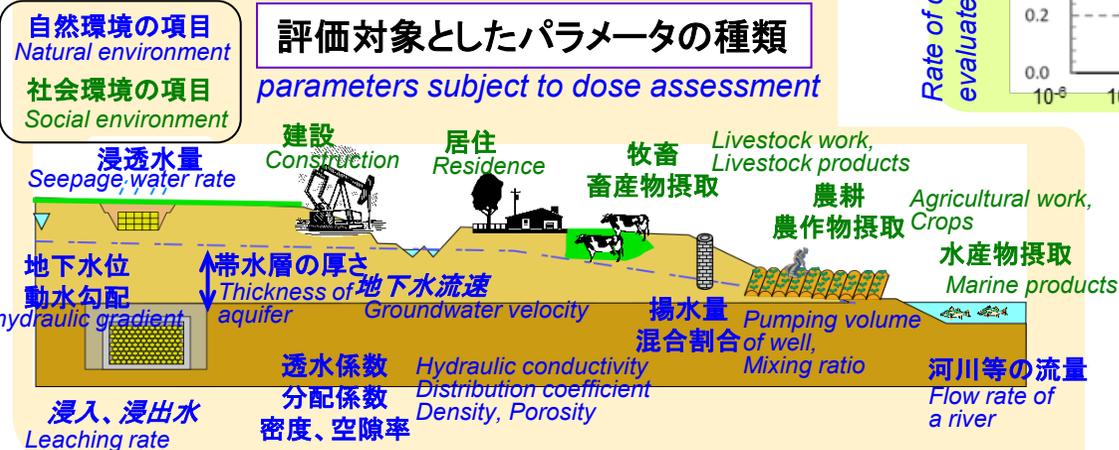
種々の被ばく経路における線量の評価結果の分布例

Examples of distributions of dose at various exposure pathways



評価対象としたパラメータの種類

parameters subject to dose assessment



- 必要な設計対応を施すことにより安全評価の基準を満足し、**立地基準項目とする必要性がないことを確認**

More than 97.5 % of 1,000 evaluated doses for each exposure pathway were lower than the dose criteria by taking the appropriate engineering measures. Therefore, we judged that these parameters do not need to be selected as the siting criteria from these results.

※1 PNC - TN7450 96-002 における土壌及び風化岩盤のデータを基に作成。 ※2 国土交通省の水文水質観測データベースを基に作成

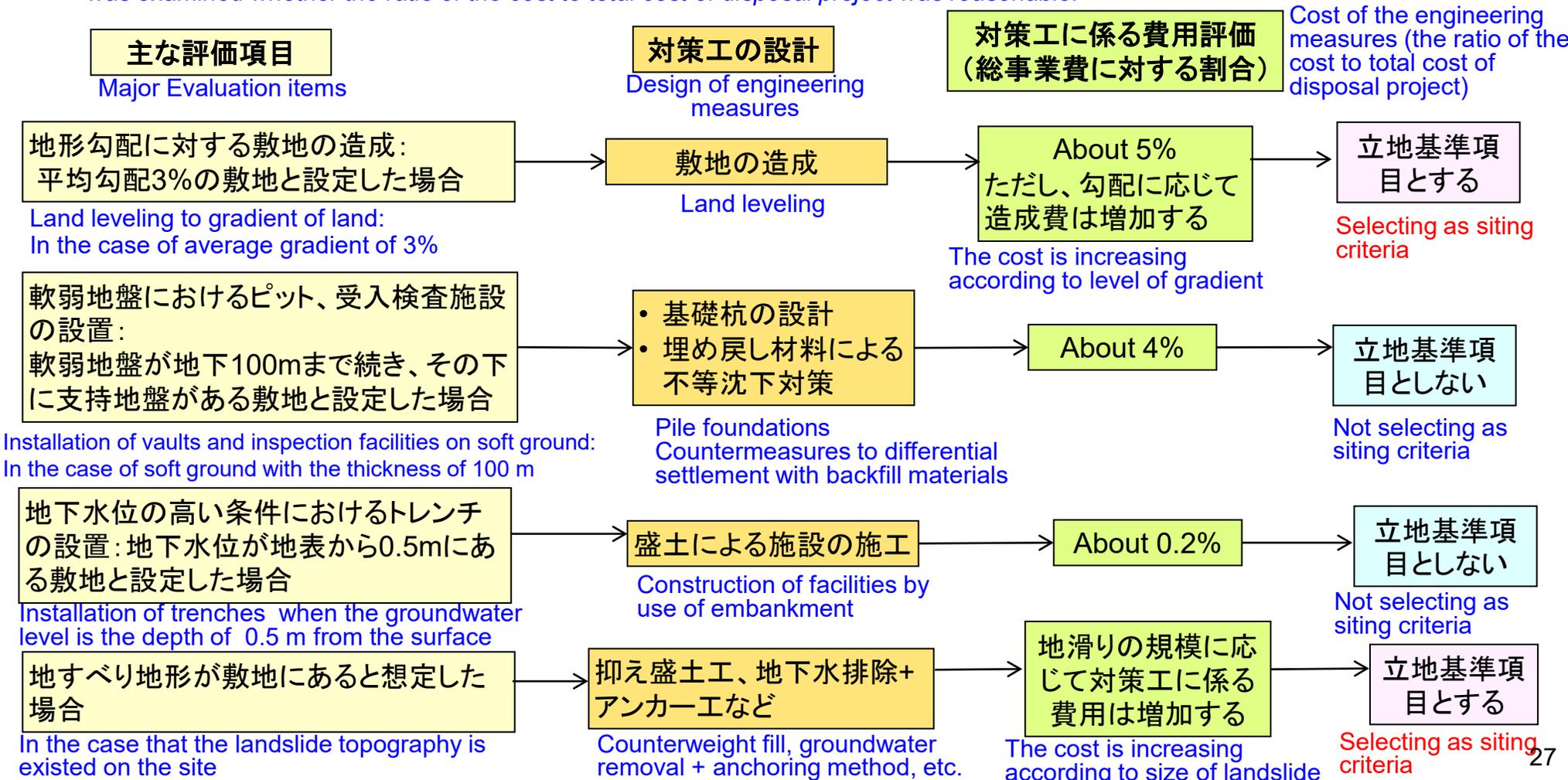


敷地の整地等に係る項目のパラメータスタディの評価結果

Evaluation Result of Parameter Study of Items regarding Land Leveling, etc.

- 評価項目毎に評価条件を設定し、対策工を設計の上、その費用を算出して総事業費に対する割合を評価。その結果、合理的な範囲内であるかどうかを確認。

Engineering measures were considered for each item. The cost for the measures was calculated. As a result, it was examined whether the ratio of the cost to total cost of disposal project was reasonable.





Establishment of Siting Criteria

検討結果に基づいて、埋設事業の実施計画及び別途JAEAが文書に定めて、以下のように策定

Based on the examination results, siting criteria were described in the implementation plan for the disposal project and in the other document published by JAEA. Siting criteria are as follows.

The site characteristic needs to meet these criteria

適合性評価項目

- **安全性 (Safety)**
「火山」、「津波」、「陥没」、「地滑り」、「洪水」、「断層(活断層)」
Volcanoes, tsunamis, depressions, landslides, floods, active faults
- **環境保全 (Environmental Protection)**
「土地利用に係る規制・計画」、「文化財の保護」
Regulation / Plan regarding land use, Protection of cultural asset
- **その他 (Others)**
「事業用地面積」
Area of disposal site

It is favorable for site characteristics to meet these criteria

比較評価項目

- **経済性・利便性(用地面積を除く。)** **Economy / Convenience (except for area of disposal site)**
 - 「事業用地」: 用地取得、造成工事等に係る費用、用地形状の好ましさ
Disposal site : Cost of site acquisition and land leveling. Favorable to site shape.
 - 「輸送の利便性」:
Convenience of transportation of RW
 - 「事業の効率性」:
Efficiency of operation of disposal facilities
- **社会的要件 Social Requirements**
 - 「用地取得の容易性」:
Easiness of land acquisition
 - 「地域社会の受容性」:
Acceptance of local society



Future Work regarding Siting Criteria

- 原子力機構の埋設事業の実施計画において、埋設施設の立地の選定に係る手順は、以下となっている。

In the implementation plan of the disposal project of JAEA, the siting procedures are as follows.

- 1) 埋設事業の適切な運営が可能と考えられる地点の属する“**地方自治体への協力要請方式**”とし、

*A method of the requesting cooperation to local governments^{*a} which the candidate site belongs to*

- 2) 協力要請方式による地点の選定の状況等を踏まえて、必要に応じて埋設事業に関心を有する基礎自治体^{*1}の募集も行う。(“**基礎自治体^{*1}の募集方式**”)

*Another method for recruiting municipalities^{*b} who are interested in attracting disposal facilities, if necessary.*

- 実施計画に記載のこのような手順に基づき立地選定を進めるにあたり、手続きの透明性を確保して公正な選定を行うため、引き続き、**立地基準に対する評価方法及び立地手順の具体的な内容について詳細を検討**する。

In order to ensure the transparency of the procedure and to execute the fair site selection, JAEA will continue to examine the details of the assessment method for the siting criteria and details of the siting procedures.

*1: 基礎自治体は、市区町村を意味している。

**a: Local governments mean government of the prefecture and government of city (or town, or village, etc.)*

**b: Municipality means government of city (or town, or village, etc.)*



今後の検討について

*Future Works regarding Technical Development of
Near Surface Disposal of LLW Generated from
Research Facilities, etc.*



今後の課題

Future Works

- 今後 (R4～R10: JAEAの第4中長期目標期間) に向けた課題 *Future Works from 2022 to 2028*

立地活動を進めるため、理解促進活動を関係機関等の協力の下で進めるとともに、以下の技術的な検討を行う。

In order to proceed with siting activities, JAEA will promote the activities to enhance the understanding about disposal of LLW generated from research facilities, etc. with the cooperation of related organizations and will also conduct the following technical developments.

- ◆ 埋設施設の基本設計に向けた技術検討等 (これまでの成果の体系的な整理によるセーフティケースの構築) を進める。

JAEA will proceed with technical studies for the basic design of the disposal facilities (making the safety case by systematically organizing the study and development results so far).

- ◆ 廃棄物発生者の着実な廃棄体製作の推進への支援に向けた廃棄体受入基準整備を進める。

JAEA will continue to develop waste acceptance criteria (WAC) to help waste generators with the treatment and conditioning of waste packages



Thank you!

放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム
Comprehensive Symposium on Latest Trends in
Radioactive Waste Disposal Technology

TRU廃棄物の地層処分におけるガス発生の影響に関する研究開発
R&D on influences of gas generation on geological disposal of TRU waste

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

Radioactive Waste Management funding and research Center (RWMC)

地層処分バリアシステム研究開発部

Geological disposal barrier system R&D division

藤井 直樹 Naoki FUJII

八木 翼 Tsubasa YAGI

発表内容

1. TRU廃棄物の概要
2. 背景及び目的
3. TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価
4. 廃棄体パッケージ充填材を対象としたガス発生量の低減対策
5. 人工バリアのガス移行挙動とそのモデル化

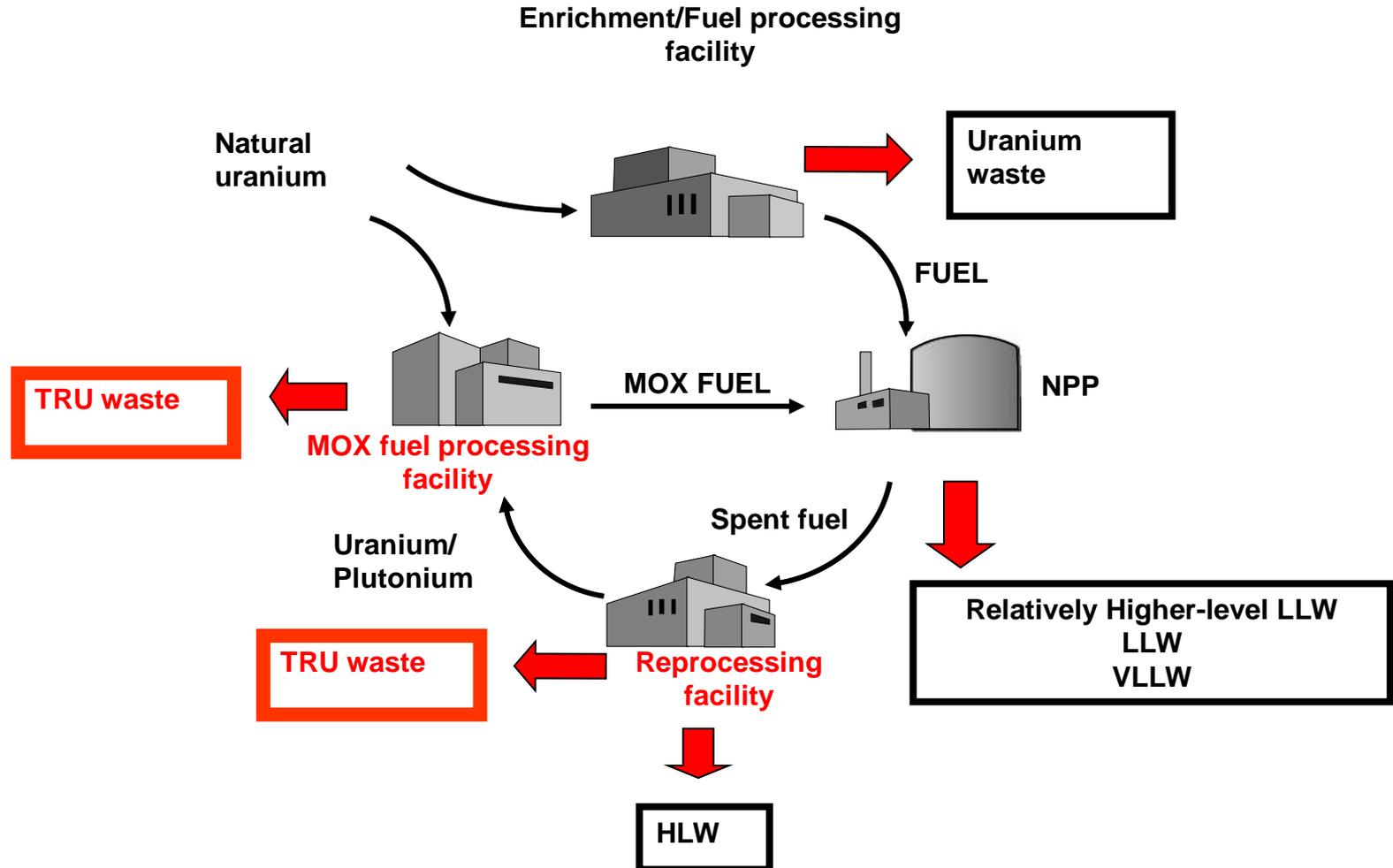
本日の内容は、経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した以下の各研究開発等に基づく成果です。

- 平成19年度～平成24年度地層処分技術調査等委託費 TRU廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発（5. の内容）
- 平成25年度～平成28年度 地層処分技術調査等事業 T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発（5. の内容）
- 平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597） T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発（5. の内容）
- 平成30年度～令和2年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597） T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発（3. 4. 5. の内容）

1. TRU廃棄物の概要

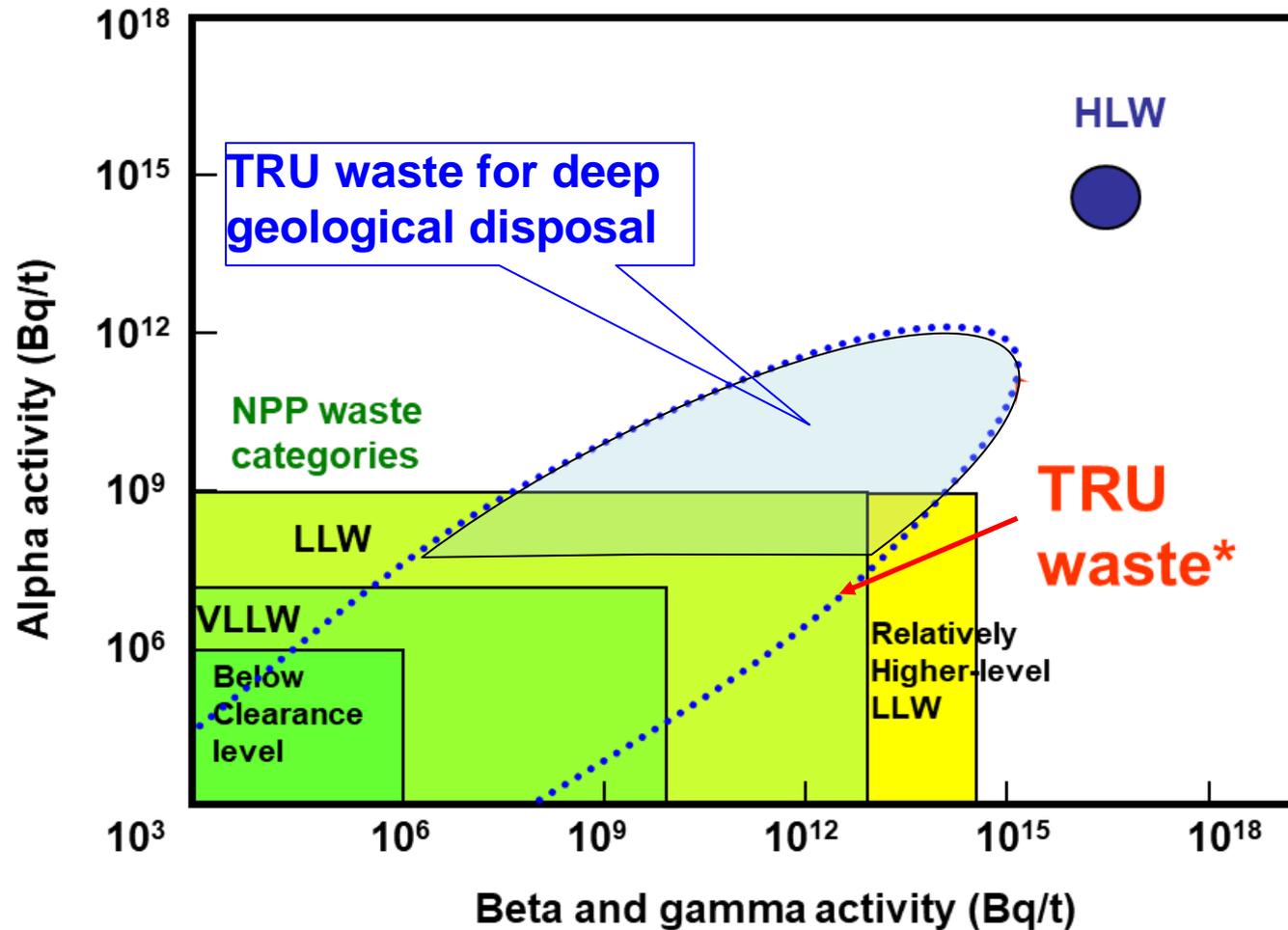
Radioactive waste in Japan

(excluding medical, research, industrial wastes)



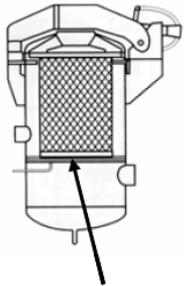
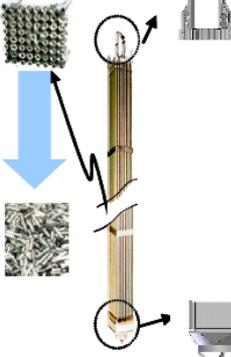
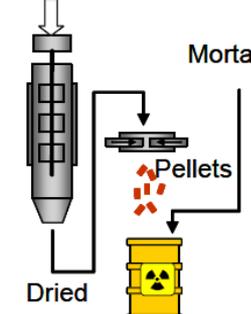
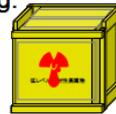
1. TRU廃棄物の概要

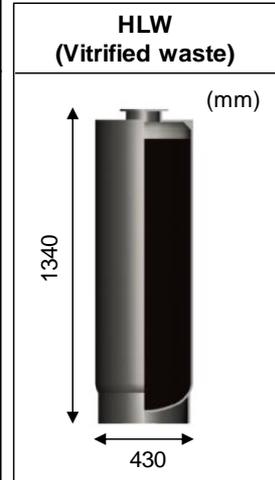
Radionuclide concentration of TRU waste in Japan



1. TRU廃棄物の概要

Various types of TRU waste

| | Group 1 | Group 2 | Group 3 | Group 4 | Group 4 H |
|---------------|--|--|--|--|--|
| Content | <p>Spent silver absorbent</p>  <p>Iodine absorber</p> | <p>Hulls</p>  <p>End-pieces</p>  | <p>Solidified concentrated liquid waste</p>  <p>Mortar</p> <p>Pellets</p> <p>Dried</p> | <p>Poorly combustible waste</p>  <p>e.g. rubber gloves</p> <p>Non-combustible waste</p>  <p>E.g., tools, metal pipes</p> | <p>Vitrification furnaces etc.</p>  |
| Waste package | E.g.  | E.g.  | E.g.  | E.g.   | E.g.  |
| Features | <ul style="list-style-type: none"> • Radioiodine (I-129) | <ul style="list-style-type: none"> • Heat generating • Radiocarobon (C-14) | <ul style="list-style-type: none"> • Includes nitrates from PUREX reprocessing • Solidified waste with mortar or bitumen | <ul style="list-style-type: none"> • Incineration ash • Non-combustibles • Solidified waste with mortar, etc. | <ul style="list-style-type: none"> • Includes heat generating glass melter wastes • Solidified waste with mortar, etc. |



Total TRU waste : more than 19,000 m³ Co-disposal was studied.

TRU廃棄物はガス発生源となる金属、セメントを多く含む

2. 背景

地層処分において想定されるガスの発生要因

1. 放射線分解によって発生するガス (Radiolysis)

- ・周囲の地下水や廃棄体パッケージ容器内の水の分解で発生する水素ガス
- ・アスファルトの分解によって発生するガス

廃棄物を定置し、パッケージ周辺を充填した段階から発生する。

セメント系材料に含まれる自由水 (Free water in mortar) も発生源になるため、設計によっては容器内での発生も考慮する必要がある。

2. 還元雰囲気での金属の腐食にともなって発生する水素ガス (Metal corrosion)

処分坑道内が冠水し、還元環境となった後に発生する。

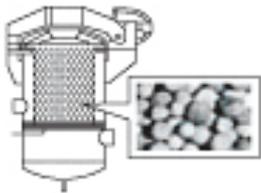
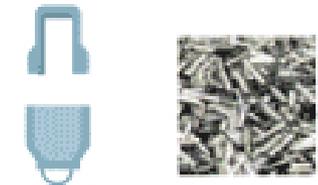
腐食にともなって発生するため、**ガス発生速度、量を算出するためには、還元環境での腐食速度を知る必要がある。**

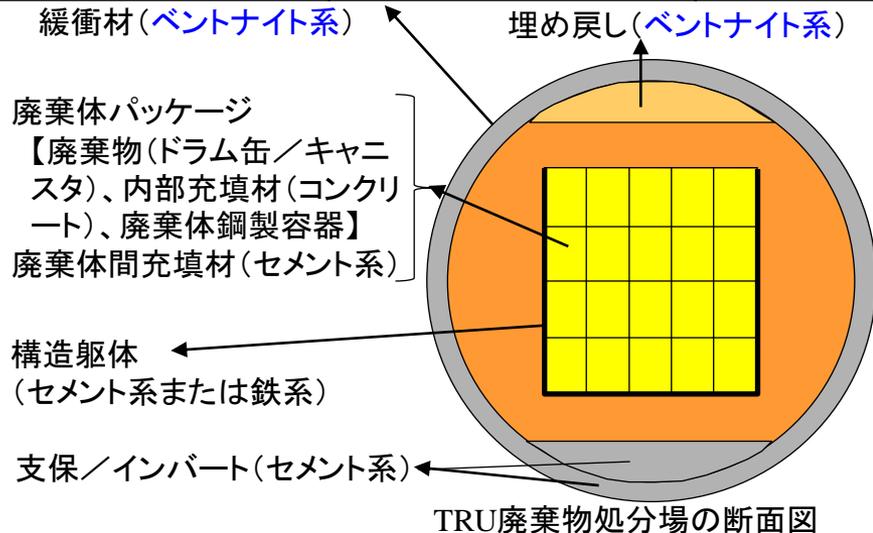
3. 微生物活動によって発生するガス (Microbial activity)

アスファルトやセルロースなどの有機物の微生物分解によって CO_2 、 N_2 、 CH_4 ガスが発生すると推定されているが、処分場周囲の環境によって微生物の種類、活動が異なるため、ジェネリックに設定することは難しい。

2. 背景

TRU廃棄物の地層処分において想定されるガスの発生源

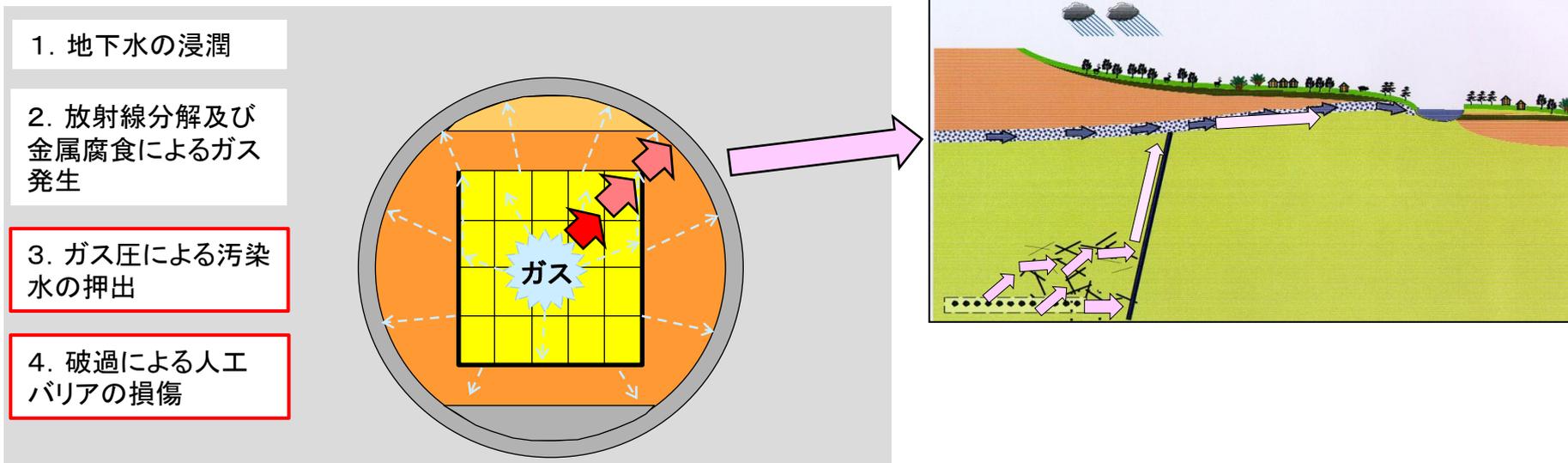
| TRU廃棄物 | | | | |
|---|--|---|--|----------------|
| 廃銀吸着材  | ハル・エンドピース  エンドピース ハル | 低レベル濃縮廃液 (アスファルト固化体及びモルタル充填固化体等)  | 可燃、難燃、不燃廃棄物 (モルタル充填固化体等)  可燃物(紙、布等) 難燃物(ゴム手袋、ビニール等) 不燃物(配管、工具、ガラス等) | |
| (レファレンスは)セメント固化 | 【圧縮充填】 | モルタル固化、セメント固化及びアスファルト固化 | モルタル固化、セメント固化 | |
| グループ1 | グループ2 | グループ3 | グループ4 (低発熱性) | グループ4 (発熱性) |



- 放射線分解によって発生する水素ガス
 - 各廃棄物の固化材として使用されるセメント
 - グループ3のアスファルト
 - セメント系の内部充填材や廃棄体間充填材
 - 緩衝材やセメント系の構造材料
- 金属の腐食にともなって発生する水素ガス
 - 廃棄物として持ち込まれる金属
 - 廃棄体の金属容器
 - 金属製の構造材料

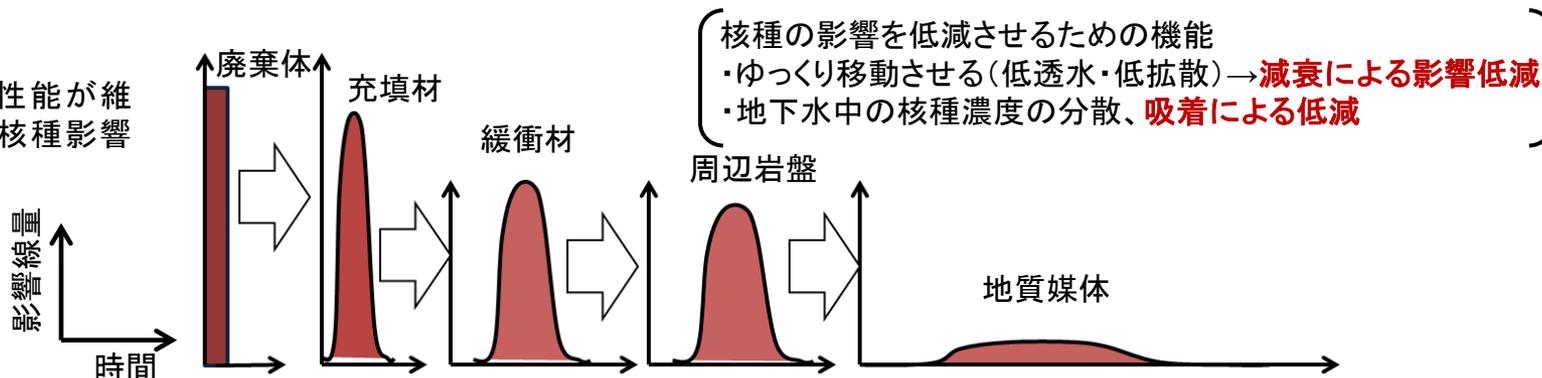
2. 背景

放射性廃棄物（TRU）処分において想定されるガス問題



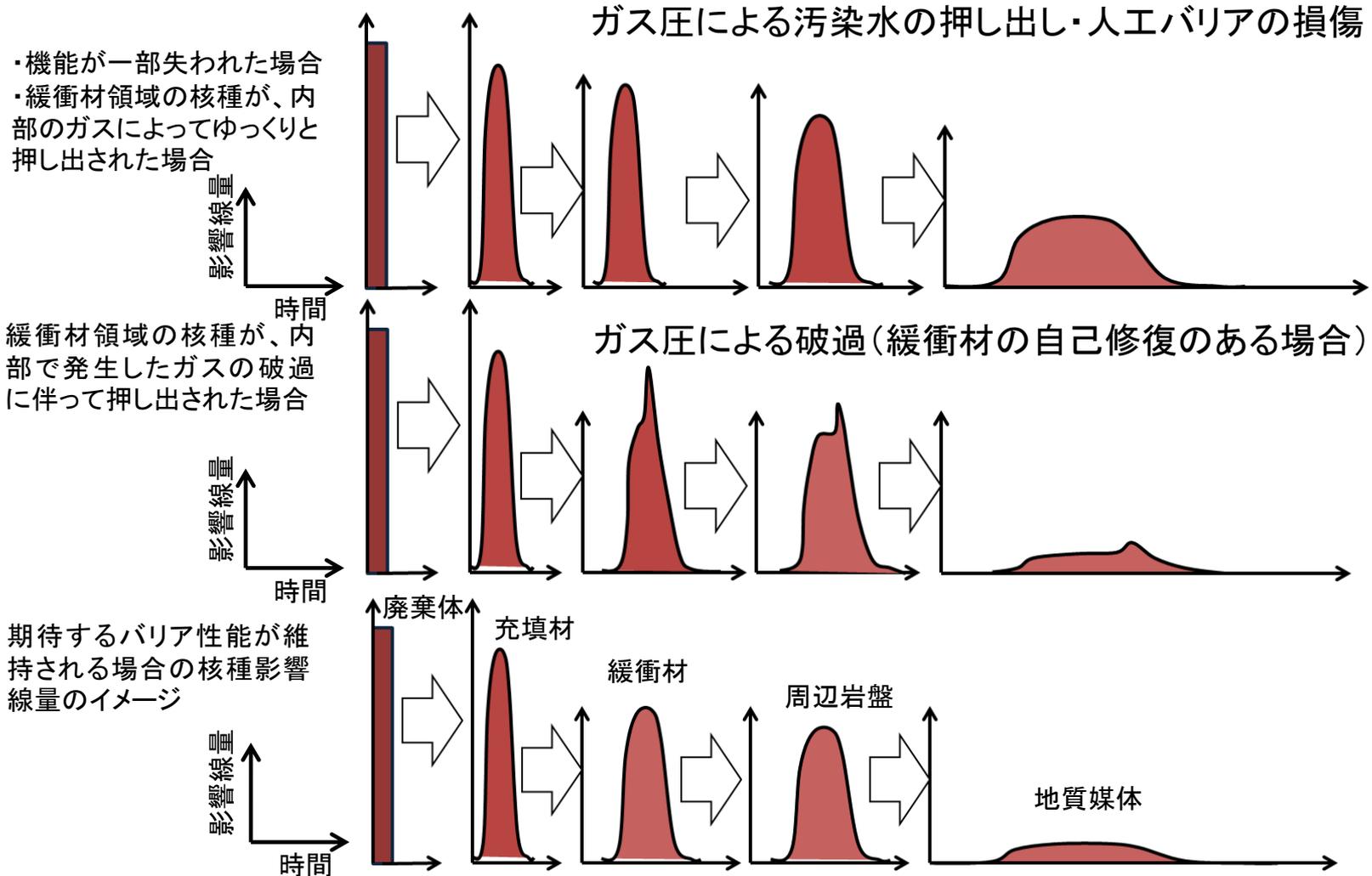
| | | | | | |
|----|-----|-----|--------------|-------------|-------------|
| 領域 | 廃棄体 | 充填材 | 緩衝材 | 周辺岩盤 | 地質媒体 |
| 現象 | 放出 | 収着 | 収着・低拡散 減衰 | 収着・分散 減衰 | 収着・分散 減衰 |

期待するバリア性能が維持される場合の核種影響線量のイメージ



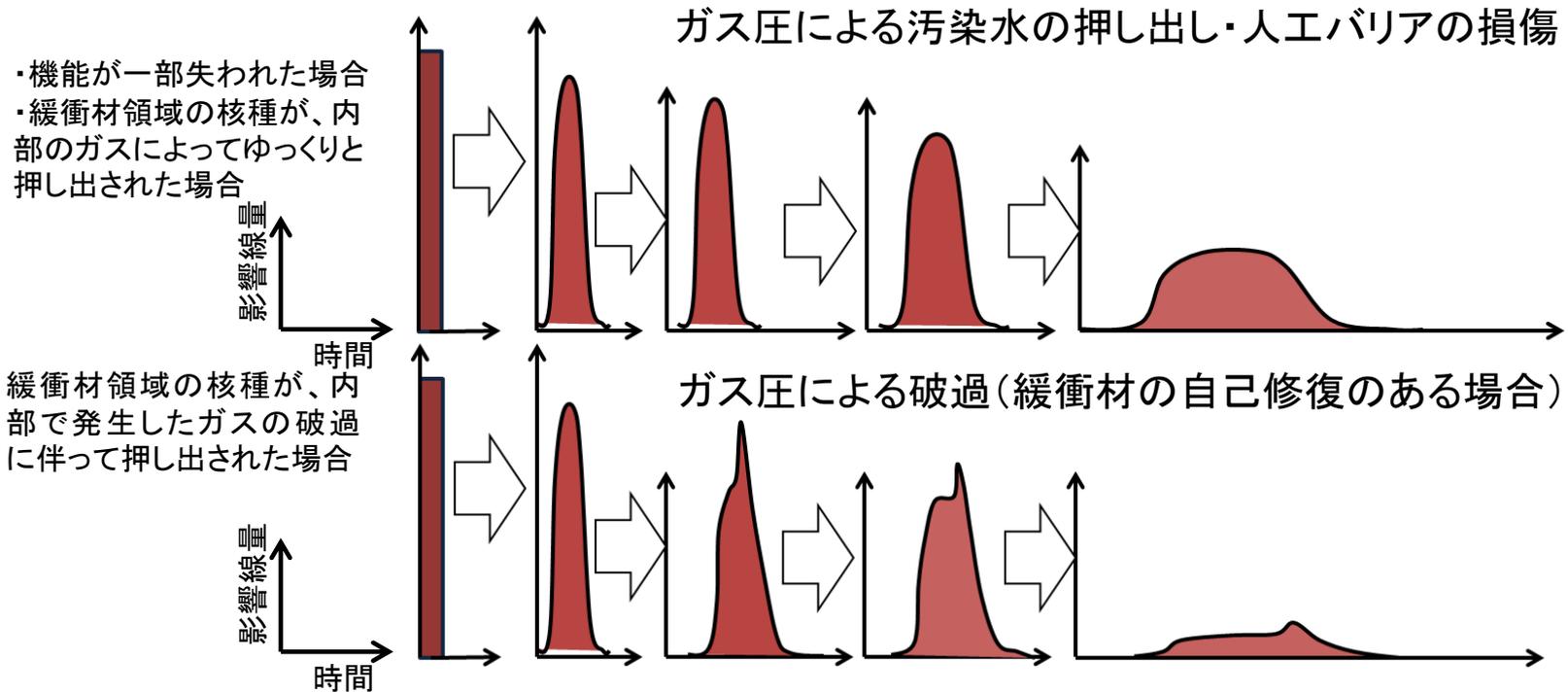
2. 背景

放射性廃棄物（TRU）処分において想定されるガス問題



2. 背景

放射性廃棄物（TRU）処分において想定されるガス問題

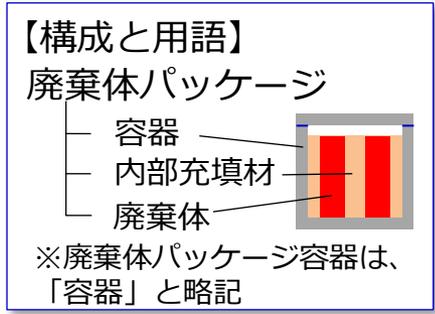


- ・上記のようにガス発生によって核種移行に影響を及ぼす破過やそれによる人工バリアの（核種移行の抑制機能を低減させるような）損傷等の現象が生じるのか？
- ・ガス発生による移行挙動や破過が生じる場所、時間等が精度良く予測できるのか？

2. 背景

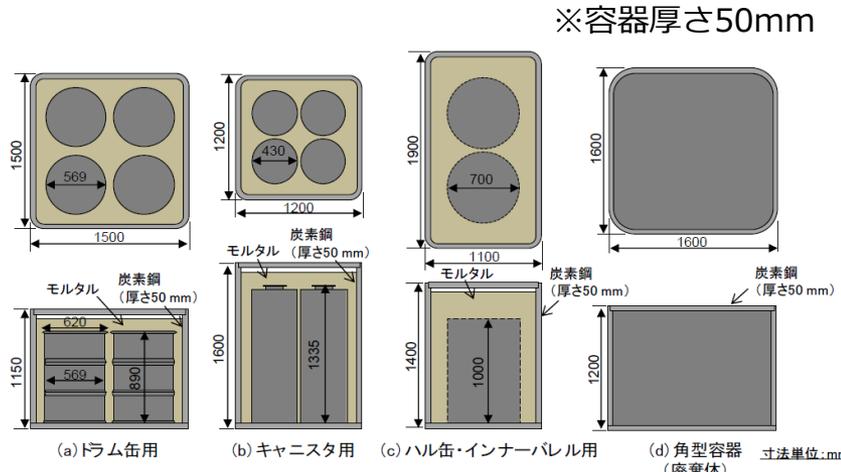
TRU廃棄物の廃棄体パッケージ

- **廃棄体パッケージAの形状・概要** 【第2次TRUレポート】
 - ・容器：廃棄体の収納方法、パッケージの強度、製作方法やハンドリング性などを考慮して厚さ5mmの鋼製廃棄体パッケージ
 - ・廃棄物の閉じ込め性：なし
 - ・構造健全性：パッケージ内をモルタルで充填固化。充填材の強度により構造健全性を確保。



- **廃棄体パッケージBの形状・概要** 【NUMO包括的技術報告書(NUMO SC)】

- ・容器：SM400Aを対象とし、操業時の耐食性、荷重(吊下げ、積上げ)を考慮して50mm厚
- ・廃棄物の閉じ込め性：万が一の落下時の放射性物質の漏洩を防ぐため上蓋は溶接して廃棄体を封入する構造
- ・落下時の健全性：落下高さの制限(<8m)を設け、見通しを得ている
- ・閉鎖後長期の安全性の評価：300年の平均腐食厚さ0.3mm (最大5.3mm)、10MPa(静水圧1000m)でひずみは限界に達せず、容器が開口することはないとして構造健全性を担保



廃棄体パッケージBの概略図
 (NUMO 包括的技術報告書(レビュー版)より)

- 発生ガスによる内圧の上昇が廃棄体パッケージの閉じ込め性に影響しないか？
- ・必要なガス発生抑制対策とこれらを反映したガス発生量評価は？

2. 目的

TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価

NUMO-SC等の最新知見に基づく処分条件と現実的な人工バリアの状態設定を反映した**ガス発生挙動（発生量の経時変化）**の評価

廃棄体パッケージ充填材を対象としたガス発生量の低減対策

操業期間中の安全性の向上に加え、閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージBについて、**放射性分解による**水素ガスの発生要因を踏まえ、**水素ガス発生抑制**が可能な**セメント系内部充填材**の仕様と施工方法の提示。

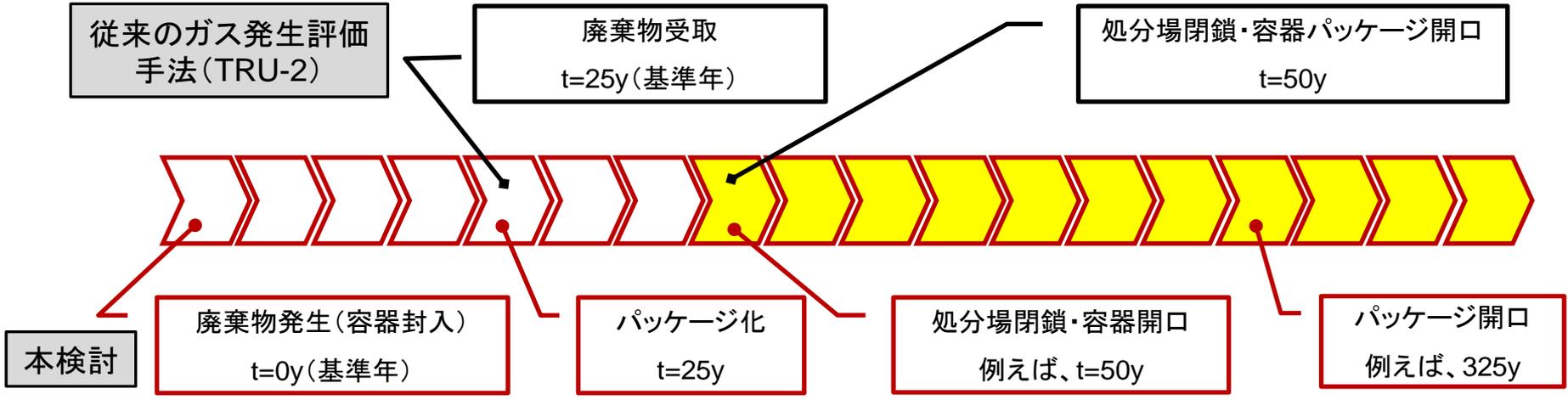
人工バリアのガス移行挙動とそのモデル化

ガス影響評価に不可欠な長期の人工バリア（特にベントナイト緩衝材）中のガス移行解析に必要な二相（ガス相及び水相）流の移行特性について、**小規模モックアップ試験**によるガス移行挙動の現象理解と3次元の実規模スケールに適用するための現象解析モデルの高度化。

3. TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価

TRU廃棄物処分場でのガス発生量の評価

より現実的なガス発生挙動の経時的な定量評価



| 項目 | TRU-2 | 例：TR14-03 (NUMO) | 本検討 |
|-----------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| インベントリ | 廃棄物受取時 (t=25y) | 廃棄物受取時 (t=25y) | 廃棄物発生後 (t=0y) |
| ガス発生開始 | (おそらく) 処分場閉鎖時 | 廃棄物受取時 (t=25y) | 廃棄体発生時 (t=0y) |
| 水 (放射線分解) | 閉鎖後直ちに開口し、地下水が常に豊富に存在 | 開口 (500y) するまでは、内部の水を消費してガス発生反応が進行 | 開口 (300y) するまでは、内部の水を消費してガス発生反応が進行 |

◆ 廃棄体パッケージの寿命までの期間の様々なイベントを考慮して、各々の水素ガス発生モードで競合的に消費する水の量を(枯渇の可能性を含め)考慮し、①金属の嫌気性腐食及び②水の放射線分解によるガス発生量とその経時変化の評価

金属の嫌気性腐食によるガス発生量の評価

評価条件の設定

| 部材 | 種類 | 腐食モデル | CR : 腐食速度 [m/y] | 金属量[Mg] | S: 評価上の表面積[m ²] | 厚さt/直径[mm] |
|-----------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| エンドピース | SUS | 平板 | 2.0 E-8 (※1) | 1584.0 (※2、※6) | 49.6 (※1、※4) | 0.34 (※1) |
| ハル | ジルカロイ | 平板 | 5.0 E-9 (※1) | 3168.0 (※2、※6) | 221.4 (※4) | 0.71 (※7) |
| キャニスタ | SUS | 平板 | 2.0 E-8 (※1) | 858.0 (※2、※6) | 1.8 (※4) | 5 (※1) |
| 廃棄体パッケージ | 炭素鋼 | 平板 | 1.0 E-7 (※1) | 6341.8 (※2、※6) | 10.56 (※5) | 50 (※1) |
| ロックボルト | 炭素鋼 | 円筒 | 1.0 E-7 (※1) | 28.9 (※2、※3、※6) | 568.9 (※6) | Φ 25 (※3) |
| 鉄筋 (構造躯体) | 炭素鋼 | 円筒 | 1.0 E-7 (※1) | 337.6 (※2、※6) | 鉄筋径毎に算出 (※6) | D16,22,25,29 (※2) |

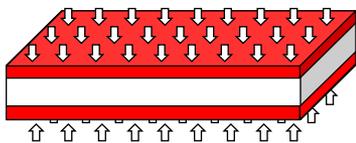
- ※1 TRU-2参照 ※4 1キャニスタ毎 ※6 1坑道毎
 ※2 NUMO包括参照 ※5 1パッケージ毎 ※7 原子力安全研究協会
 ※3 国交省標準参照

【嫌気性腐食の反応式】



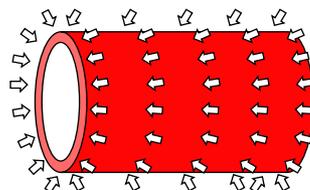
【平板モデル】

廃棄体 (ハル・エンドピース、キャニスタ)
 廃棄体パッケージ容器



【円筒モデル】

鉄筋、ロックボルト



【水素ガス発生速度】

$$\Delta \text{HR} = K \times S \times \text{CR} \quad [\text{mol/y}]$$

ΔHR : 水素ガス発生速度

K : 換算係数 [mol/m³]

S : 評価上の表面積 [m²]

CR : 金属の腐食速度 [mol/y]

$$K = \text{ST} \div \rho \div A \times 10^6 \quad [\text{mol/m}^3]$$

ST : 腐食金属当たりの水素ガス発生の化学量論

ρ : 換算係数 [mol/m³] [mol·H/mol·M]

A : 金属の原子量 [g/mol]

水の放射線分解によるガス発生量の評価

評価条件の設定

水素ガス発生量 = G値 × 放出エネルギー × エネルギー付与率

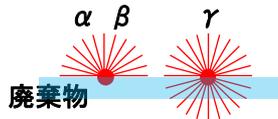
【G値の設定（暫定値として初期設定）】

| ターゲット | G 値 [molecules/100eV] | | | 出典 |
|-------|-----------------------|------|------|--|
| | α線 | β線 | γ線 | |
| 水 | 1.3 | 0.45 | 0.45 | Christensen and Bjergbakke (1983), Bjergbakke et al. (1991) |

【エネルギー付与率の設定】

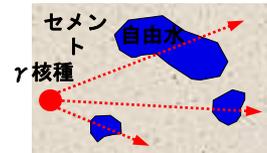
各線種ごとに、『核種の賦存状況』、『混合率（水の割合）』、『透過率』の積として表現される。

➤ 核種の賦存状況



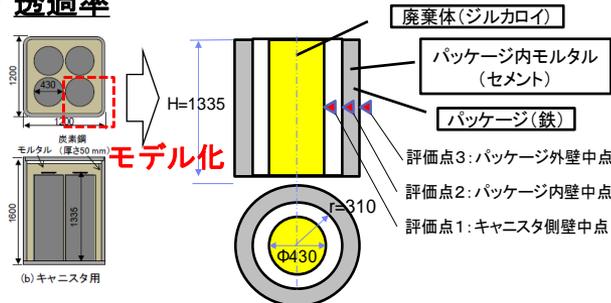
| ターゲット | 線種 | | | 核種賦存状況による放射線エネルギー付与割合 |
|---------------|-------|----|----|-----------------------|
| | α線 | β線 | γ線 | |
| 廃棄体内水 | 0.5 | | | 1 |
| パッケージ内モルタル自由水 | 評価対象外 | | | 1 |

➤ 混合率（水の割合）



| ターゲット | 線種 | | | 充填材混合率による放射線エネルギー付与割合 |
|---------------|---------|----|---------|--------------------------|
| | α線 | β線 | γ線 | |
| 廃棄体内水 | 0 (開口前) | | 0 (開口前) | 1 (開口後) |
| パッケージ内モルタル自由水 | 評価対象外 | | | 0.21 (開口前) 0.22 (開口後) |

➤ 透過率



| 名称 | 廃棄体領域 (評価点1) | パッケージ内モルタル (評価点2) | パッケージ部材 (評価点3) | 人工バリア材 |
|------------|---------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 物質 | ハル等圧縮体 (ジルロイ及び SUS) | セメントモルタル | 炭素鋼 | セメント、ベントナイト、炭素鋼、等 |
| 水の放射線分解の有無 | 地下水が流入するまでは発生しない | ○ | × | 冠水した状態であれば発生する |
| 透過率 [-] | 0.693 | 0.281 | 0.0226 | 0.00344 |

遮蔽計算ツール：点減衰積分法コード QAD-CGGP2R

水の放射線分解によるガス発生量の評価

評価条件の設定

水素ガス発生量 = G値 × 放出エネルギー × エネルギー付与率

| 評価位置 | キャニスタ内 | | | 廃棄体パッケージ | | | 人工バリア | | |
|---------------------|--------|-----|-------|----------|---|-------|-------|---|-------|
| | α | β | γ | α | β | γ | α | β | γ |
| 線種 | | | | | | | | | |
| 付与率 (0y ≤ T ≤ 325y) | 0.5 | 0.5 | 0.693 | 0 | 0 | 0.059 | 0 | 0 | 0.001 |
| 付与率 (325y ≤ T) | 0.5 | 0.5 | 0.693 | 0 | 0 | 0.062 | 0 | 0 | 0.001 |

- ※ **キャニスタ内**で水の放射線分解が進行するのは**T=25y以降**
- ※ **廃棄体パッケージ**で水の放射線分解が進行するのは**T=25y以降**
- ※ **人工バリア**で水の放射線分解が進行するのは**T=50y以降**

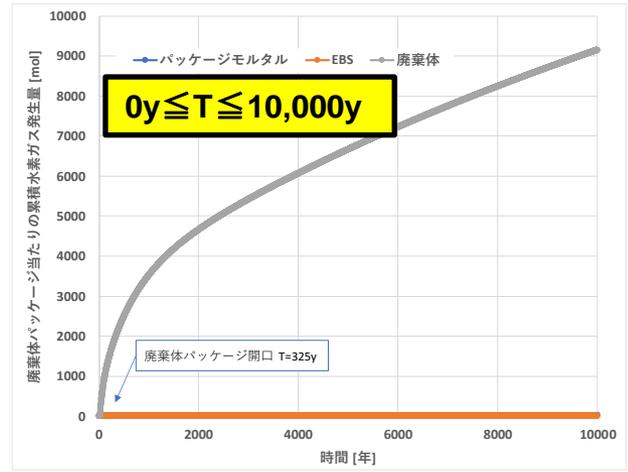
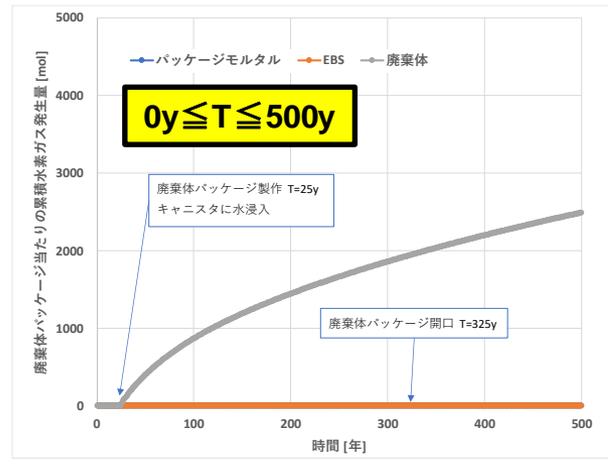
| 評価位置 | キャニスタ内 | | | 廃棄体パッケージ | | | 人工バリア | | |
|---------------------|--------|-----|-------|----------|---|-------|-------|---|-------|
| | α | β | γ | α | β | γ | α | β | γ |
| 線種 | | | | | | | | | |
| 付与率 (0y ≤ T ≤ 325y) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.059 | 0 | 0 | 0.001 |
| 付与率 (325y ≤ T) | 0.5 | 0.5 | 0.693 | 0 | 0 | 0.062 | 0 | 0 | 0.001 |

- ※ **キャニスタ内**で水の放射線分解が進行するのは**T=325y以降**
- ※ **廃棄体パッケージ**で水の放射線分解が進行するのは**T=25y以降**
- ※ **人工バリア**で水の放射線分解が進行するのは**T=50y以降**

水の放射線分解によるガス発生量の評価

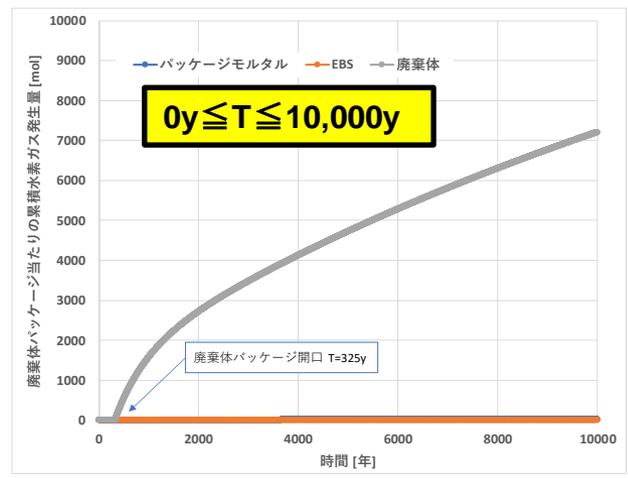
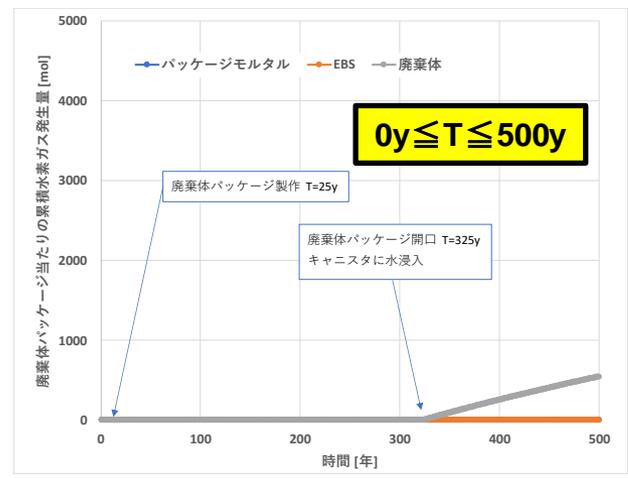
評価結果: 水の放射線分解による廃棄体パッケージ1体あたりの水素ガス発生量

【キャニスタの寿命不考慮】



- 初期(T=25y)から、廃棄物(ハル/エンドピース)からの水素ガス発生が卓越する。

【キャニスタの寿命=パッケージの寿命】

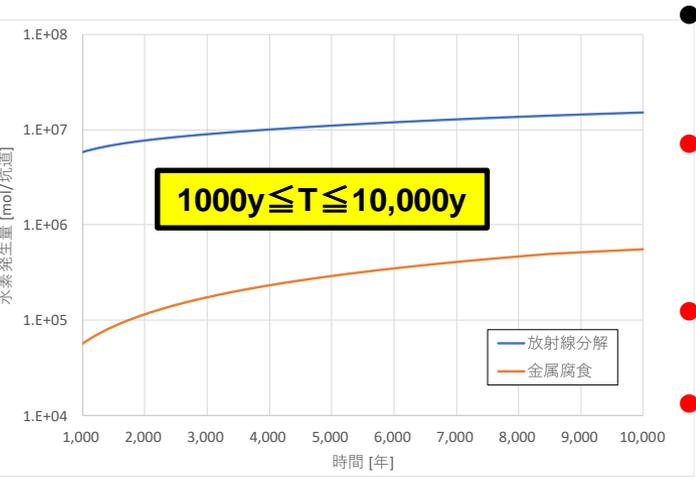
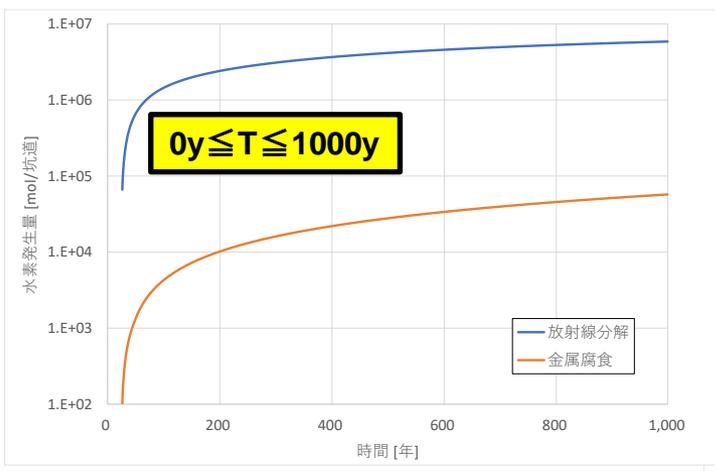


- 25 ≤ T ≤ 325yの間は、廃棄体パッケージモルタルからの水素ガス発生が卓越する。
- T=325y以降は、キャニスタ内にも水が流入し、廃棄物(ハル/エンドピース)からの水素ガス発生が卓越する。

金属の嫌気性腐食及び水の放射線分解によるガス発生量

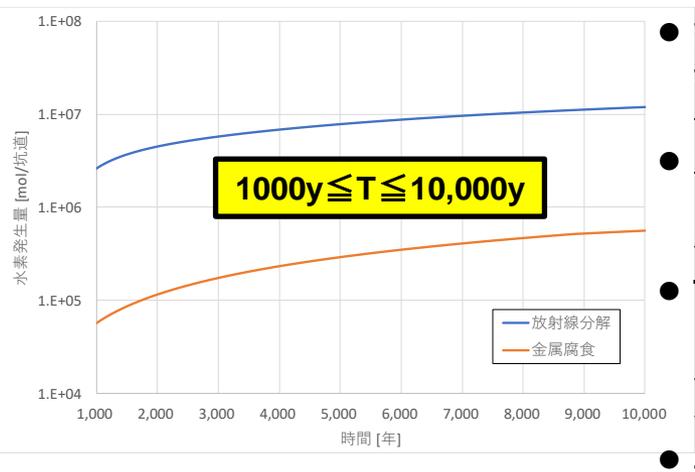
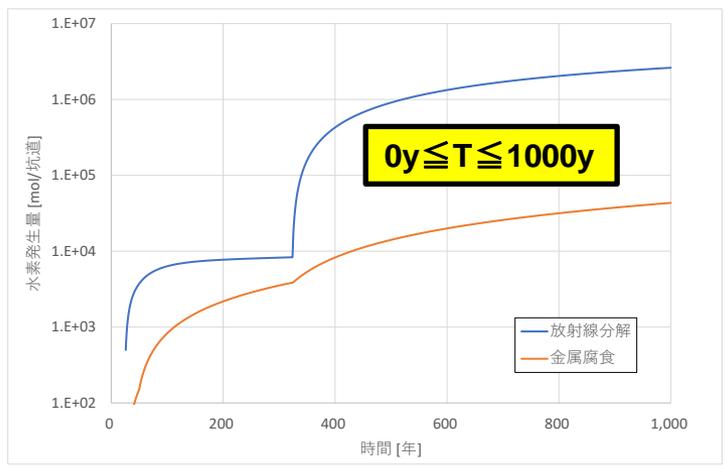
評価結果: 坑道(157.55m)1本あたりの水素ガス発生量(放射線分解/金属腐食統合)

【キャニスタの寿命不考慮】



- 評価期間を通じて、ほぼ、(放射線分解によるガス発生量) > (金属腐食によるガス発生量)
- 廃棄体パッケージ開口 (T=325y) までに水が枯渇することなく、水の放射線分解/嫌気性腐食による水素ガス発生が継続。
- T=325yで廃棄体パッケージが開口し、地下水が流入。
- エンドピースは、8,525yで消失。

【キャニスタの寿命=パッケージの寿命】



- 評価期間を通じて、ほぼ、(放射線分解によるガス発生量) > (金属腐食によるガス発生量)
- 廃棄体パッケージ開口 (T=325y) までに、廃棄体パッケージ内の水分が枯渇することはない。
- T=325yで廃棄体パッケージが開口し、キャニスタ内部にも地下水が流入することで放射線分解/金属腐食が増大。
- エンドピースは、8,825yで消失。

4. 廃棄体パッケージ充填材を対象とした ガス発生量の低減対策

セメント系充填材からの放射線分解による水素ガス発生

閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能が必要な廃棄体パッケージBにおける内部充填材の仕様の検討

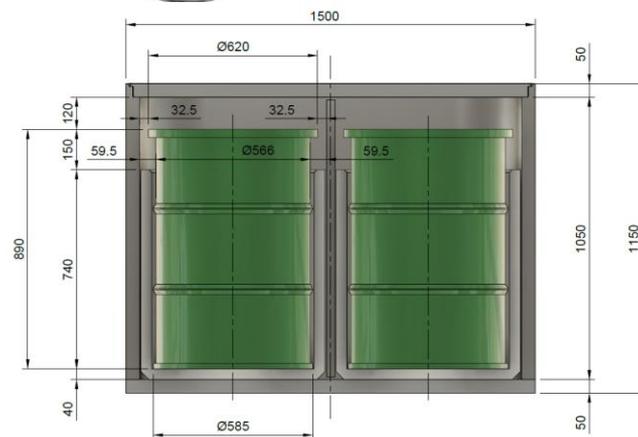
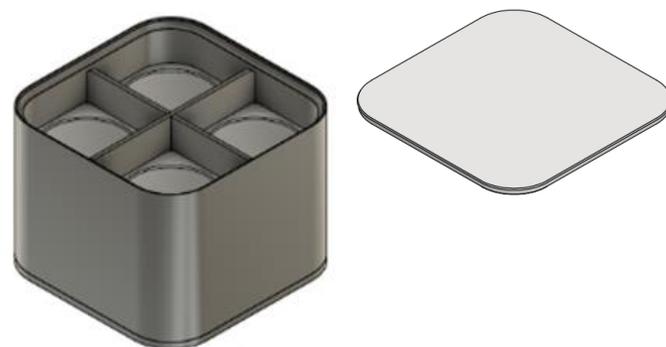
セメント系材料（セメントペースト、モルタル、コンクリート）を対象とする場合、セメント中の水の放射性分解による水素ガスの発生の影響を考慮しなければならない。



- ◆ セメント系充填材からの放射線分解による水素ガス発生量を見積もるために、セメント・骨材の種類、配合、乾燥条件等の異なるセメント系材料の照射試験によりガス発生挙動を把握しG値を評価する。



- ◆ 放射性分解による水素ガスの発生要因を踏まえ、水素ガス発生の抑制が可能なセメント系内部充填材の仕様と施工方法を提示する。



廃棄体パッケージB（ドラム缶用）の概略図

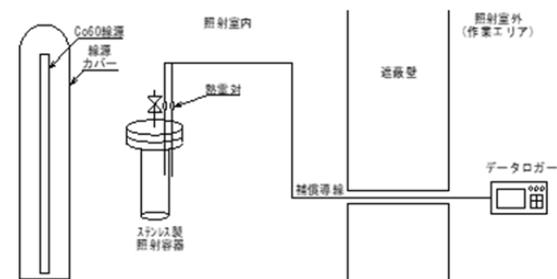
セメント系材料の照射試験

照射試験

| 項目 | 条件 |
|-------|----------------------|
| 線源 | コバルト60 (Co-60) |
| 吸収線量 | 5 kGy (1 kGy/h × 5h) |
| 雰囲気ガス | 高純度空気 |
| 照射時温度 | 室温 |
| 測定項目 | 水素 |

比較項目

- モルタル⇔コンクリート
- セメント・骨材の種類
- 配合 (W/C, S/C)
- 乾燥条件



照射試験での照射イメージ (コンクリート試料)

- モルタル試料 (配合、乾燥条件など)

| 試料名 | 試料条件 | | | | | | 自由水 % | 結合水 % | 全水分 % |
|-----------|-----------------|----|------|-----|-----------|----------|-------|-------|-------|
| | セメント(C) | 骨材 | W/C | S/C | 養生・材齢 | 乾燥条件 | | | |
| OPC-モルタル① | OPC | 砕砂 | 0.45 | 2 | 20°C、封緘4W | 表乾 | 10.1 | 6.3 | 16.4 |
| OPC-モルタル② | OPC | 砕砂 | 0.45 | 2 | | 50°C 6h | 6.1 | 6.2 | 12.3 |
| OPC-モルタル③ | OPC | 砕砂 | 0.45 | 2 | | 80°C 6h | 1.4 | 6.2 | 7.6 |
| OPC-モルタル④ | OPC | 砕砂 | 0.45 | 2 | | 80°C 24h | 1.0 | 6.1 | 7.1 |
| OPC-モルタル⑤ | OPC | 砕砂 | 0.60 | 3 | 20°C、封緘4W | 表乾 | 9.9 | 5.1 | 15.0 |
| OPC-モルタル⑥ | OPC | 珪砂 | 0.45 | 2 | 20°C、封緘4W | 表乾 | 9.0 | 5.1 | 14.1 |
| OPC-モルタル⑦ | OPC | 珪砂 | 0.60 | 3 | | 表乾 | 8.5 | 4.2 | 12.7 |
| FAC-モルタル | OPC : FA=7 : 3 | 砕砂 | 0.45 | 2 | 20°C、封緘4W | 表乾 | 11.2 | 4.4 | 15.6 |
| BFSC-モルタル | OPC : BFS=3 : 7 | 砕砂 | 0.45 | 2 | | 表乾 | 11.6 | 4.1 | 15.7 |

- コンクリート試料 (配合、乾燥条件など)

| 試料名 | 目標 スランブ (cm) | 目標 空気量 (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | 養生・材齢 | 乾燥条件 | 自由水 % | 結合水 % | 全水分 % |
|----------------|--------------------|------------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|---------------|-------------|----------|----------|----------|
| | | | | | W | C | S | G | | | | | |
| OPCコン クリート① | 18±2.5 | 4.5 ±1.5 | 45 | 44.0 | 170 | 362 | 769 | 1001 | 20°C、封緘 4W | 表乾 | 5.2 | 2.9 | 8.1 |
| OPCコン クリート② | | | | | | | | | | 80°C、 1W | 0.4 | 2.9 | 3.3 |



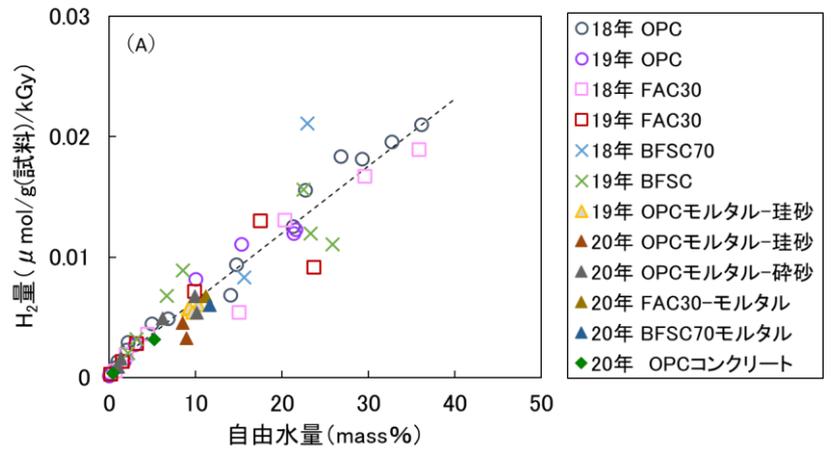
照射試験の状況



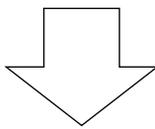
照射試験後に、照射容器内のガスを真空システム系内へ移行させ、ガスクロマトグラフィーによりH₂ガス成分を測定

セメント系材料の照射試験

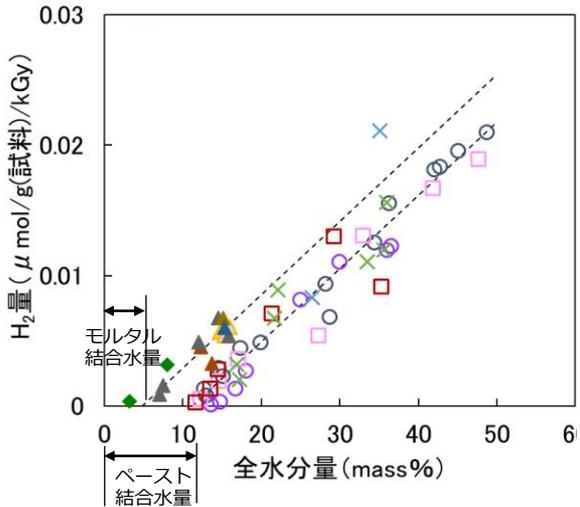
- ⇒セメントや骨材の種類、配合の違いによる水素ガス発生量の明確な差異は認められなかった。
- ⇒モルタル及びコンクリートでもペーストの結果と同様に自由水量の増加に伴い水素発生量が増加し、使用したセメント種類が異なっても概ね同一の直線関係で整理できる。
- ⇒セメント系材料（に含まれる水）のG値（ G_{H_2} (fW)）は、セメント及びモルタルともに、自由水量10mass%以上では水の G_{H_2} 値=0.45にほぼ収まる。



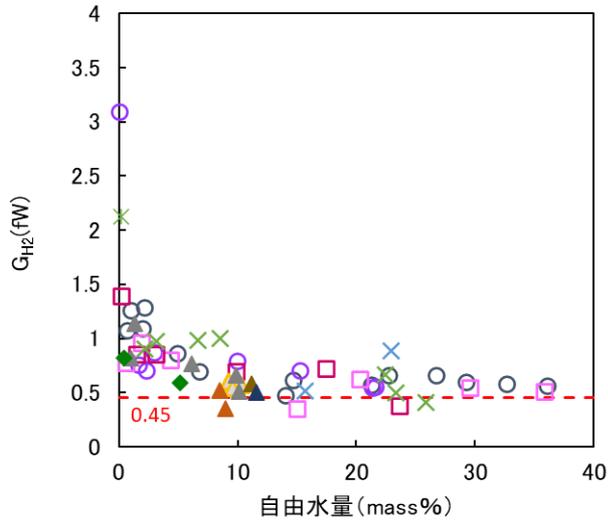
自由水量と水素ガス発生量の関係



- ・乾燥工程で自由水量を減らすことでセメント系材料の水素ガス発生量の低減は可能。
- ・G値との関係を整理し、コンクリートの水素ガス発生量の評価方法の構築に向けてさらに検討を継続。



全水分量と水素ガス発生量の関係

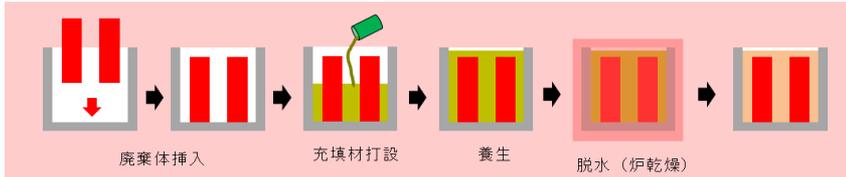


自由水量とG値の関係

内部充填材の施工時のガス発生量低減対策の検討

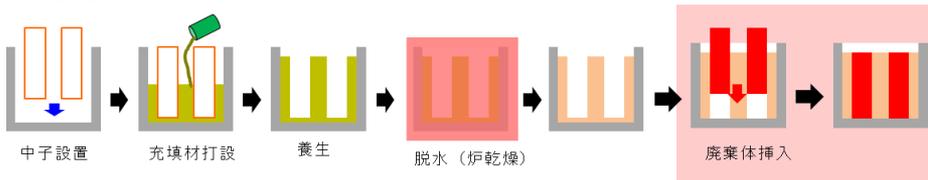
廃棄体パッケージ容器内への、廃棄体と内部充填材の収納

(a) 後打設：容器内部に廃棄体を設置し、充填材を打設



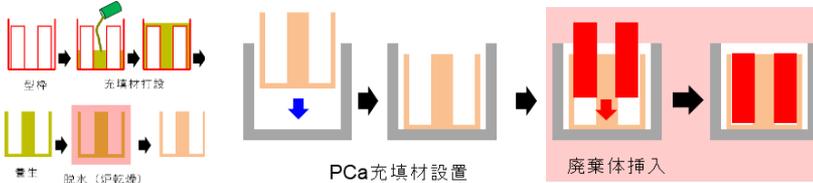
| 製作時の技術的な観点 | | 長期的な観点 | |
|------------|--|--------|--|
| 利点 | <ul style="list-style-type: none"> 廃棄体周囲に隙間が生じない。 | 利点 | <ul style="list-style-type: none"> 容器内は一体化(蓋直下は除く) 核種の収着が期待できる(安全評価) |
| 懸念 | <ul style="list-style-type: none"> 全工程が放射線環境下 打設時の廃棄体の浮上り防止 廃棄体とともに乾燥作業 | 懸念 | <ul style="list-style-type: none"> 短期/長期的な変質(熱的・化学的) 充填部に残存する水分の影響 |

(b) 先打設：容器内部に予め充填材を打設し、廃棄体を挿入



| 製作時の技術的な観点 | | 長期的な観点 | |
|------------|--|--------|--|
| 利点 | <ul style="list-style-type: none"> 打設後に乾燥工程可能 打設作業は非放射線環境 | 利点 | <ul style="list-style-type: none"> 容器と充填材は一体化 核種の収着が期待できる(安全評価) |
| 懸念 | <ul style="list-style-type: none"> 炉乾燥の大型化、品質管理 隙間の取合(廃棄体-充填材) | 懸念 | <ul style="list-style-type: none"> 短期/長期的な変質(熱的・化学的) 隙間残存(充填材-廃棄体) |

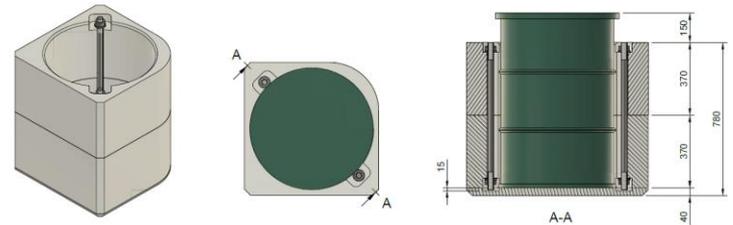
(c) プレキャスト：製作済みの充填材を容器に設置し、廃棄体を挿入



| 製作時の技術的な観点 | | 長期的な観点 | |
|------------|---|--------|---|
| 利点 | <ul style="list-style-type: none"> 乾燥作業時の他部材への影響なし 充填体挿入作業は非放射線環境 充填材の乾燥、品質管理が容易 | 利点 | <ul style="list-style-type: none"> 核種の収着が期待できる(安全評価) |
| 懸念 | <ul style="list-style-type: none"> 隙間の取合(容器-充填体、充填材-廃棄体) | 懸念 | <ul style="list-style-type: none"> 短期/長期的な変質 隙間残存(容器-充填体、充填材-廃棄体) |



プレキャストセメント系充填材の製作時(乾燥工程)のガス発生対策の確立と実規模製作試験での確認



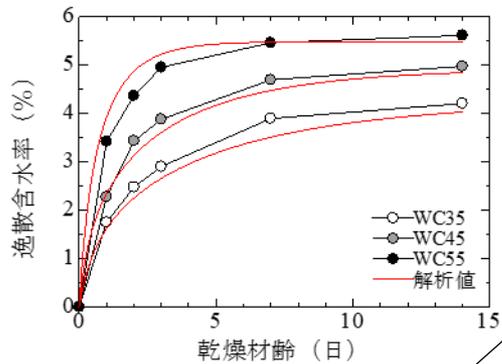
プレキャスト内部充填材完成イメージ図

内部充填材の施工時のガス発生量低減対策の検討

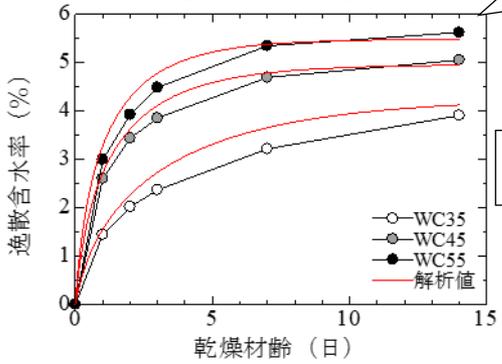
内部充填材の乾燥時の水分逸散量の推定

乾燥工程時の水分逸散量（残存水分量）の推定するために、水セメント比、乾燥条件などをパラメーターとしたコンクリートの要素試験体による水分逸散挙動に関する試験を実施。

- ⇒V/Sが小さいほど乾燥速度が大きい。
- ⇒水セメント比（W/S）が大きいほど乾燥速度が大きい。



試験体A 80°C乾燥



試験体B 80°C乾燥

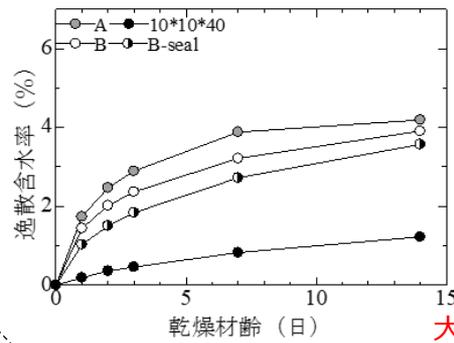


図 W/C=35 80°C乾燥

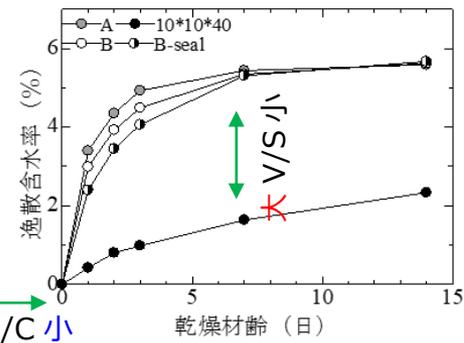
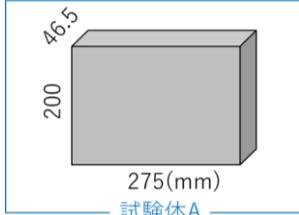


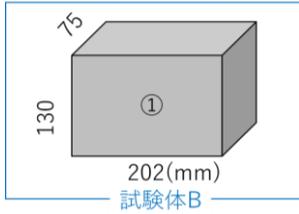
図 W/C=55 80°C乾燥

100*100*400mmの試験体等を使用して一軸のみかけの拡散係数（赤曲線の解析値）を取得することで、現在検討しているパッケージ内充填材の形状のV/Sの範囲の水分逸散量は概ね推定可能。

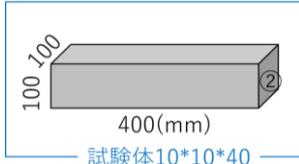
乾燥工程での温度と乾燥時間



試験体A



試験体B



試験体10*10*40

- W/C : 3水準
 - 0.35
 - 0.45
 - 0.55
 - V/S (体積/乾燥表面積) : 4水準
 - 16.6 : 試験体A 全面乾燥
 - 19.2 : 試験体B 全面乾燥
 - 37.5 : 試験体B-seal ①面裏表のみ乾燥
 - 200 : 試験体10*10*40 ②面裏表のみ乾燥
- ※分割した実部材の概算値：底材はV/S=15、中間材はV/S=30程度

水分逸散試験の試験条件

乾燥により自由水量を減らした内部充填材のガス発生量の評価

解析ケースの設定

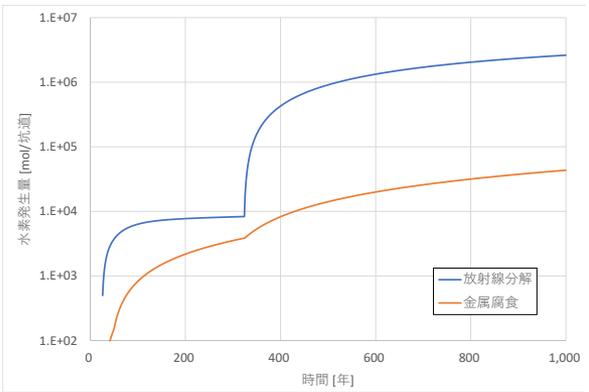
| 解析ケース | 廃棄体パッケージモルタル中の自由水量 | | | 自由水のモル数 [mol/package] |
|------------------|--------------------|------|--------------|--------------------------|
| | 体積割合 [vol %] | | 重量 | |
| | 冠水前 | 冠水後 | [kg/package] | |
| 標準ケース (昨年度実施) | 21 | 22 | 571 | 31734.6 |
| 解析ケース1-1 | 15.3 | 16.3 | 350 | 19421.6 |
| 解析ケース1-2 | 10 | 11 | 228 | 12693.9 |
| 解析ケース1-3 | 3.02 | 4.02 | 69.0 | 3833.5 |
| 解析ケース1-4 | 0.1 | 1.1 | 2.28 | 126.9 |

乾燥により自由水量を減らした内部充填材のガス発生量の評価

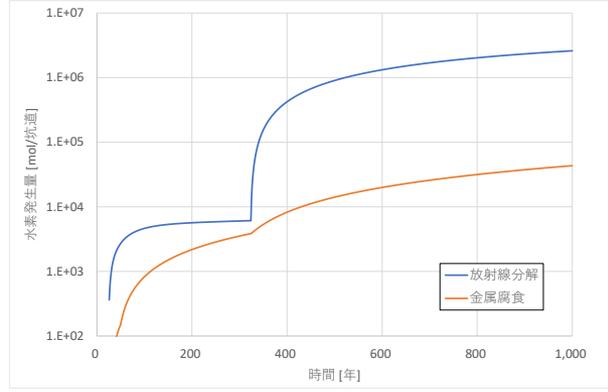
評価結果: 坑道(157.55m)1本あたりの水素ガス発生量(放射線分解/金属腐食統合)

【キャニスタの寿命=パッケージの寿命】

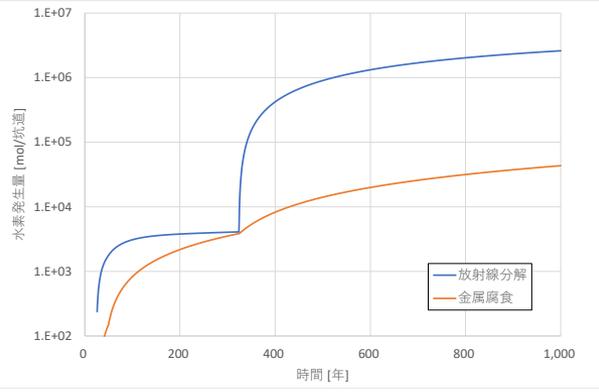
標準ケース (21 vol %)



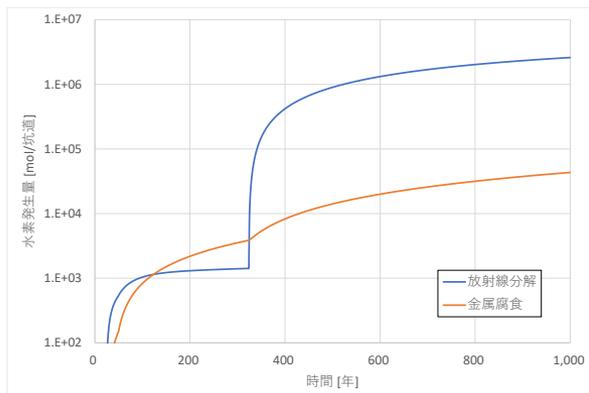
解析ケース1-1 (15.3 vol %)



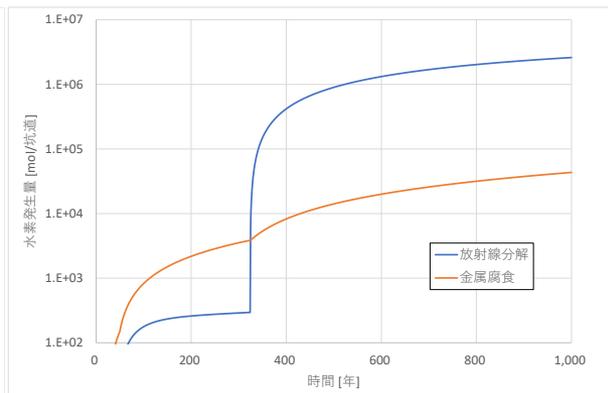
解析ケース1-2(10 vol %)



解析ケース1-3 (3.02 vol %)



解析ケース1-4 (0.1 vol %)



◆ 乾燥による内部充填材中の自由水を減少させる対策により、パッケージの閉じ込め性を期待される期間のガス発生量やパッケージの破損の要因となりうる内圧の上昇を抑えることが可能。

5. 人工バリアとそのガス移行挙動のモデル化

本研究の検討内容とガス影響評価との関連

ガスの発生・移行が核種移行挙動に及ぼす影響の程度の把握 Impact assessment of generated gas on the exposure dose

線量評価

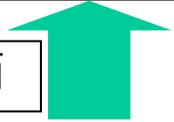


ガス移行解析結果に基づく核種移行解析

Radionuclides migration analysis based on the results of gas migration analysis

ガス発生に伴う汚染水の押出し・破過等による人工バリアの損傷といった影響を考慮

ガス移行・破過に伴う排水挙動評価



ガス移行解析 Gas(and porewater) migration analysis

モックアップ試験等の結果をもとにガス移行挙動評価モデルを高度化

二相流モデル
Two-phase flow model

ガス発生量評価
Gas generation

ガス発生量、ガスの発生時期のより現実的な評価を反映

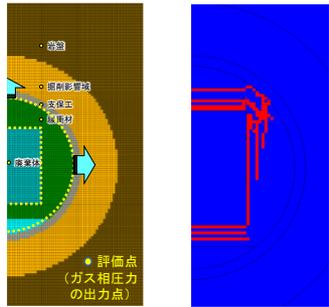
モックアップにおけるガス移行試験 Gas migration test

発生ガスの解析評価

より確からしいガス移行解析モデルの構築



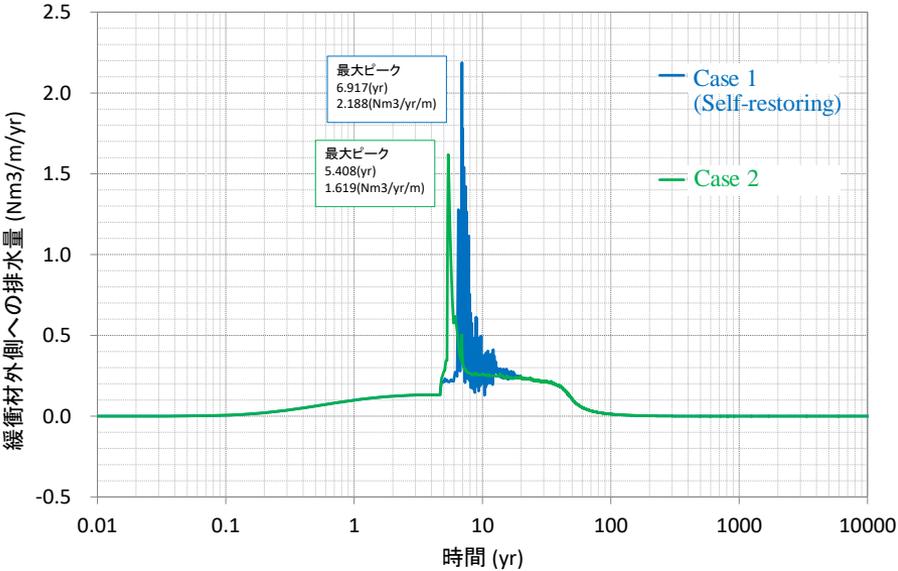
ガス移行解析



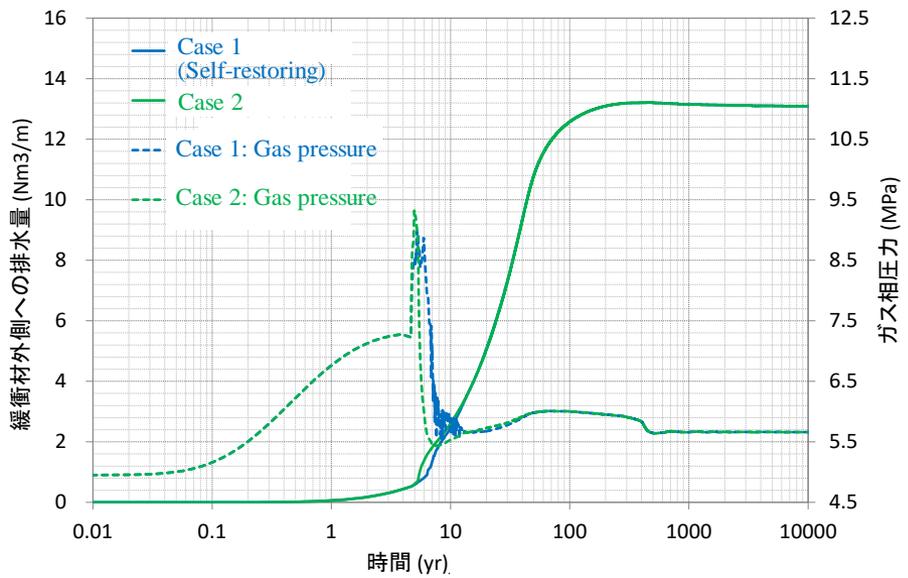
Case1
 赤色: ガスによる移行経路拡張領域

Case 1(Self-restoring): 破過後にベントナイトにより自己修復性により、ガス圧低下後にガス相・水相の排水がとまるケース

Case 2: ベントナイトの自己修復性がなく、破過経路が選択的な核種移行経路として残存するケース



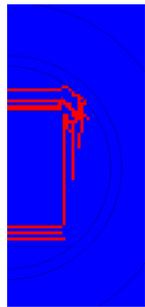
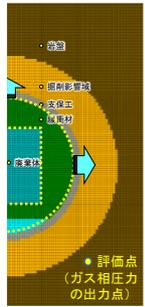
ガス発生・破過に伴う排水量



ガス発生・破過に伴うガス圧と累積排水量

発生ガスの解析評価

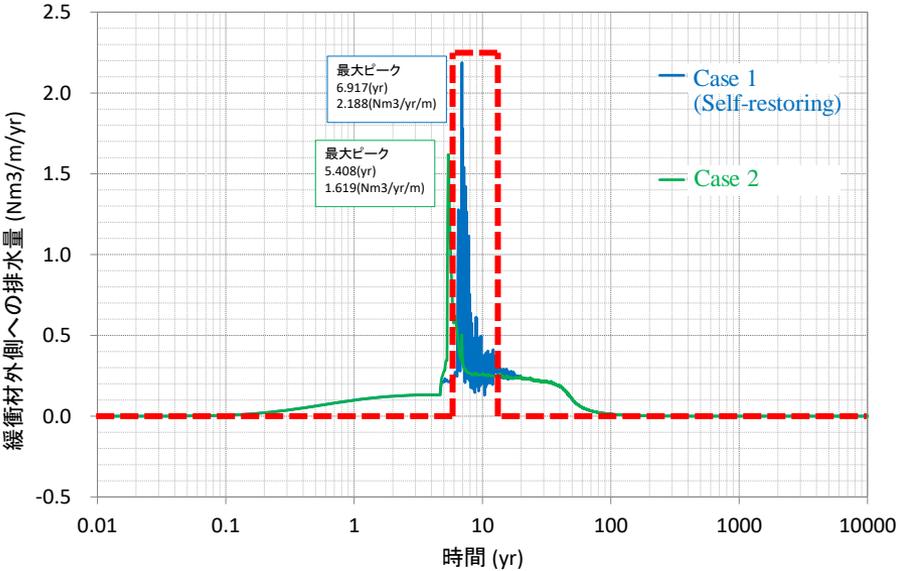
ガス移行解析による排水量の結果に基づき、放射性核種を含む汚染水の排出量を赤破線(2.2 Nm3/m/y outside the buffer for 7 years (from 6 to 13 years).)のように設定し、核種移行解析へ受け渡す。



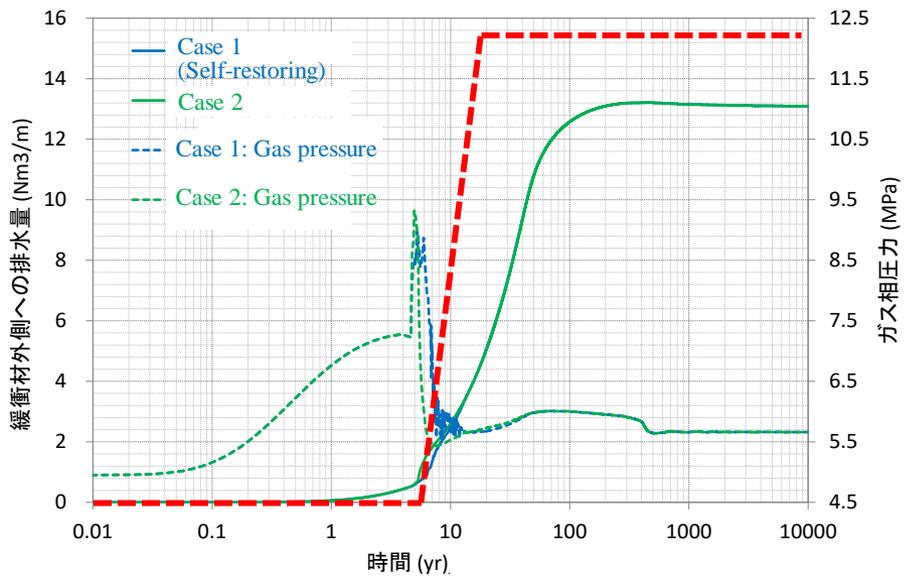
Case1
赤色:ガスによる移行経路拡張領域

Case 1(Self-restoring): 破過後にベントナイトにより自己修復性により、ガス圧低下後にガス相・水相の排水がとまるケース

Case 2: ベントナイトの自己修復性がなく、破過経路が選択的な核種移行経路として残存するケース



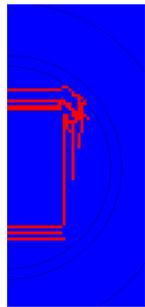
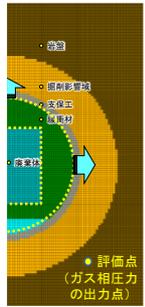
Case1 ガス発生・破過に伴う排水量



ガス発生・破過に伴うガス圧と累積排水量

発生ガスの解析評価

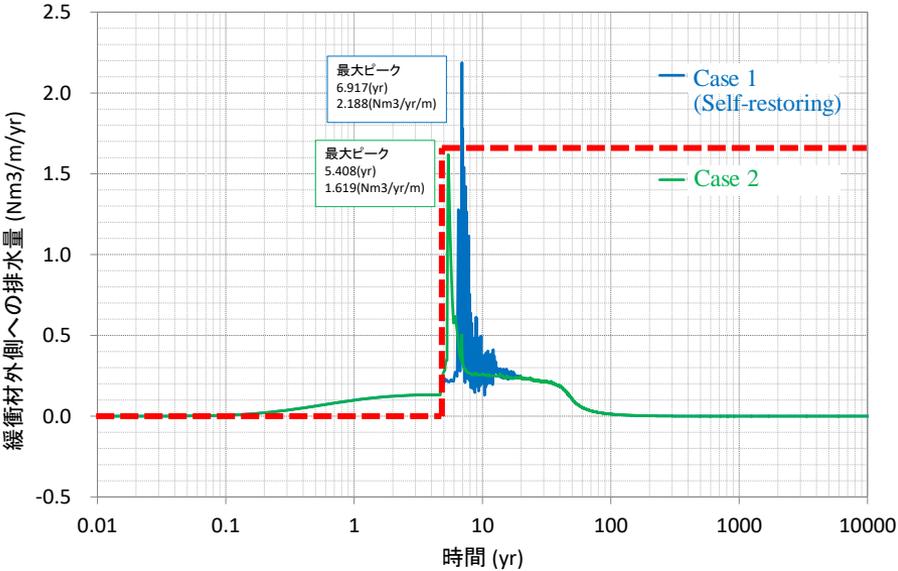
ガス移行解析による排水量の結果に基づき、放射性核種を含む汚染水の排出量を赤破線(1.6 Nm3/m/y outside the buffer after 6th year.)のように設定し、核種移行解析へ受け渡す。



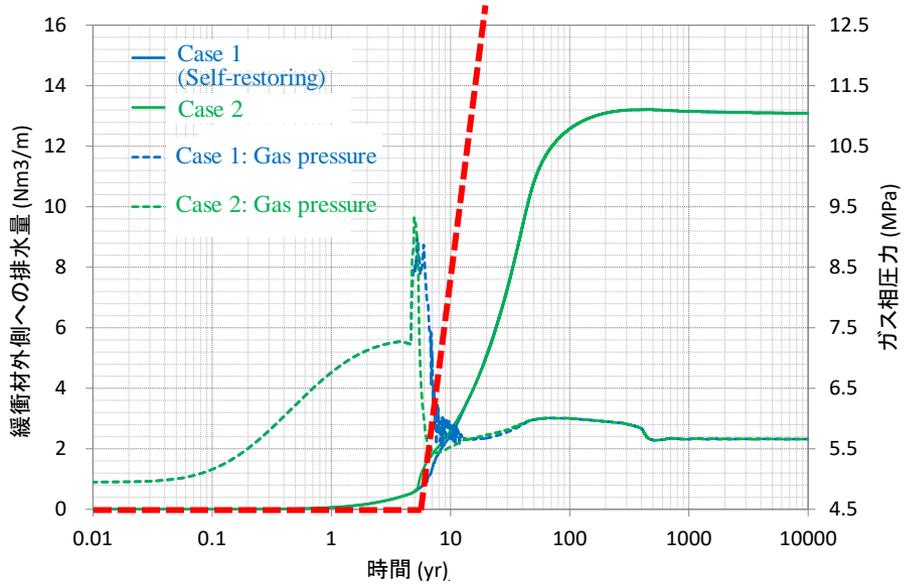
Case1
赤色:ガスによる移行経路拡張領域

Case 1(Self-restoring): 破過後にベントナイトにより自己修復性により、ガス圧低下後にガス相・水相の排水がとまるケース

Case 2: ベントナイトの自己修復性がなく、破過経路が選択的な核種移行経路として残存するケース



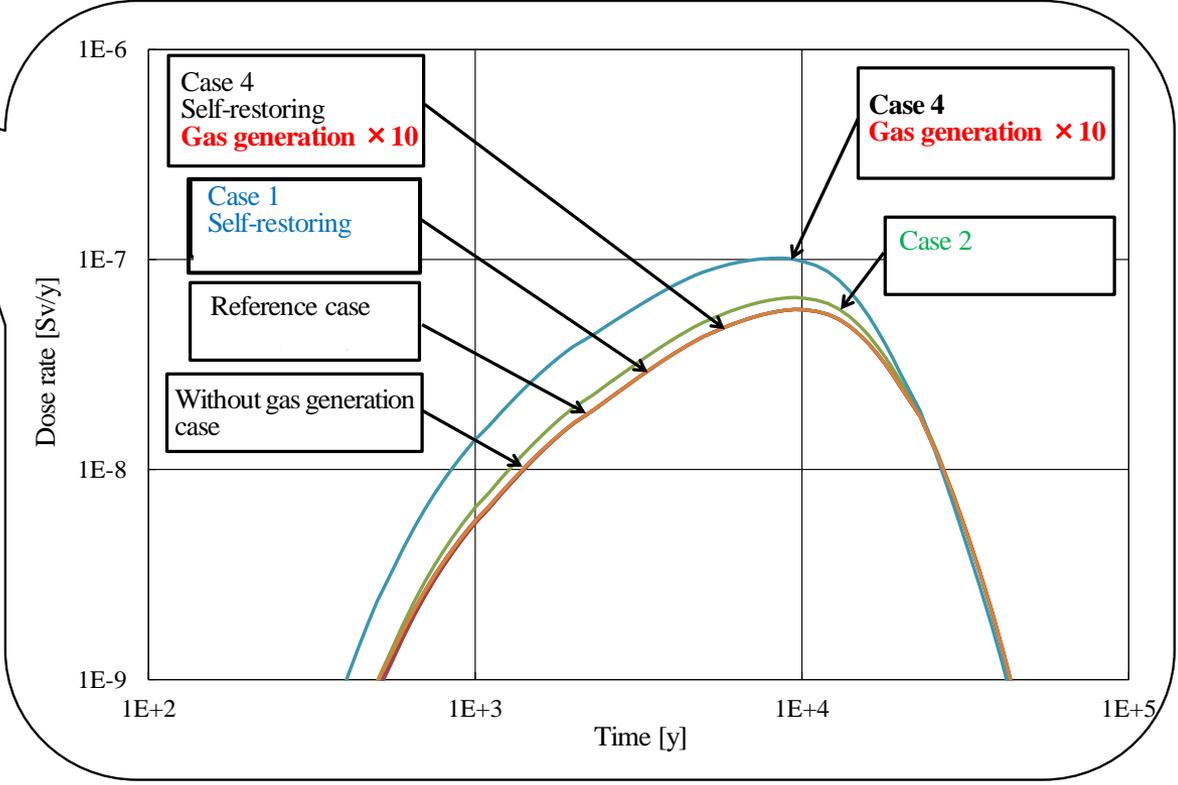
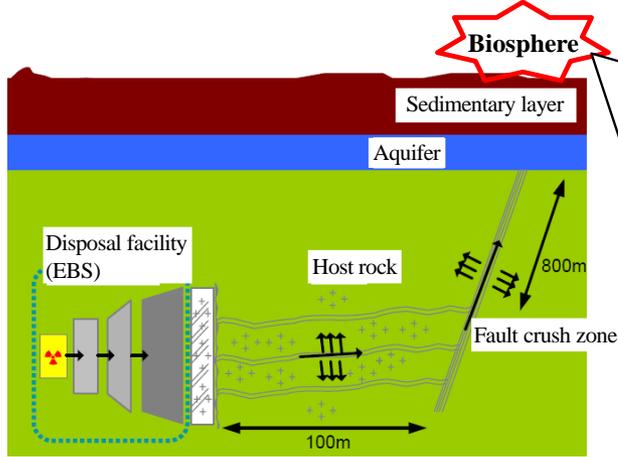
Case2 ガス発生・破過に伴う排水量



ガス発生・破過に伴うガス圧と累積排水量

発生ガスの解析評価

核種移行解析により、生物圏での線量率への発生ガスによる影響を評価。



このような発生ガスの影響評価をより精度良く実施するために、人工バリア中のガス移行(2相流としての移行パラメータ)・破過挙動及び破過後のベントナイトの自己修復性を試験で確認し、モデル化することが重要！

ガス移行挙動とそのモデル化の検討の目的

[発生ガスによる処分安全への影響]

- 施設内からのガスの蓄圧による汚染水の押出しによる核種移行および人工バリア（ベントナイト）の力学的健全性、難透水機能の低下懸念



[影響評価に必要な事項]

- ガス発生時期に対応したガス移行によるガス圧の変化・間隙水の押出し量とそれに伴う核種移行評価

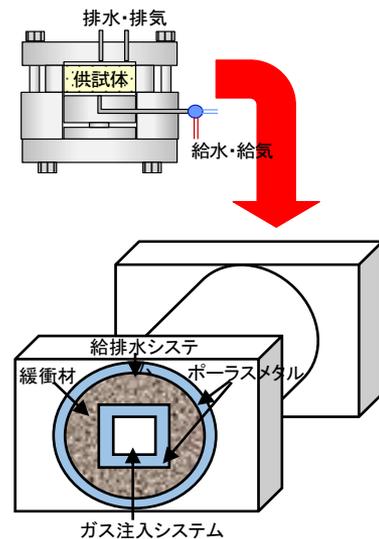
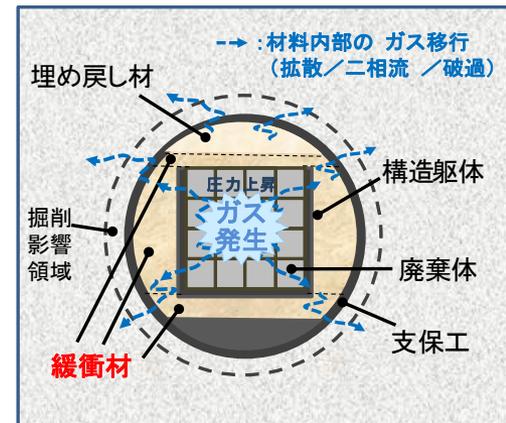


[本検討の目的]

- ◆ 処分施設構成に対応したガス・地下水移行評価モデルの高度化・解析評価
- ◆ ガス・地下水移行評価に基づく汚染水押出し水量の設定と核種移行評価

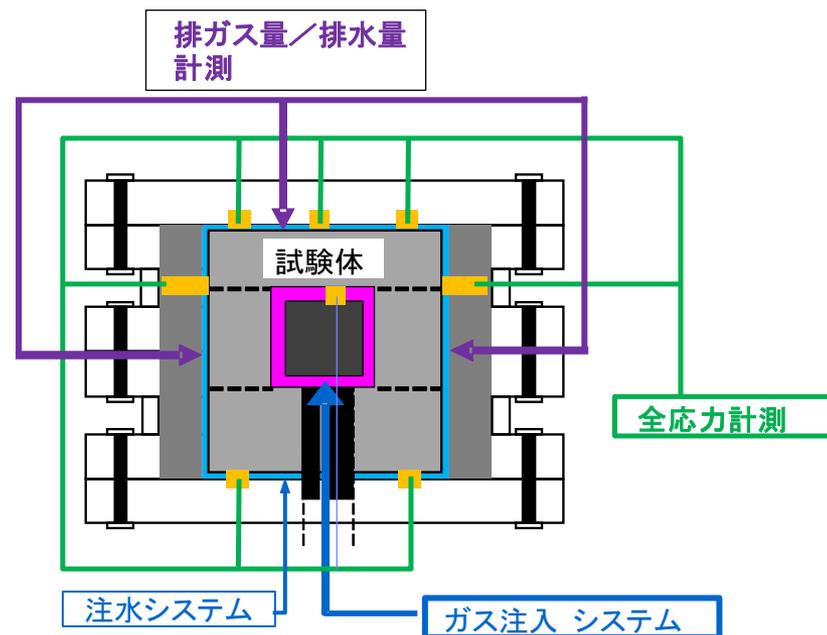
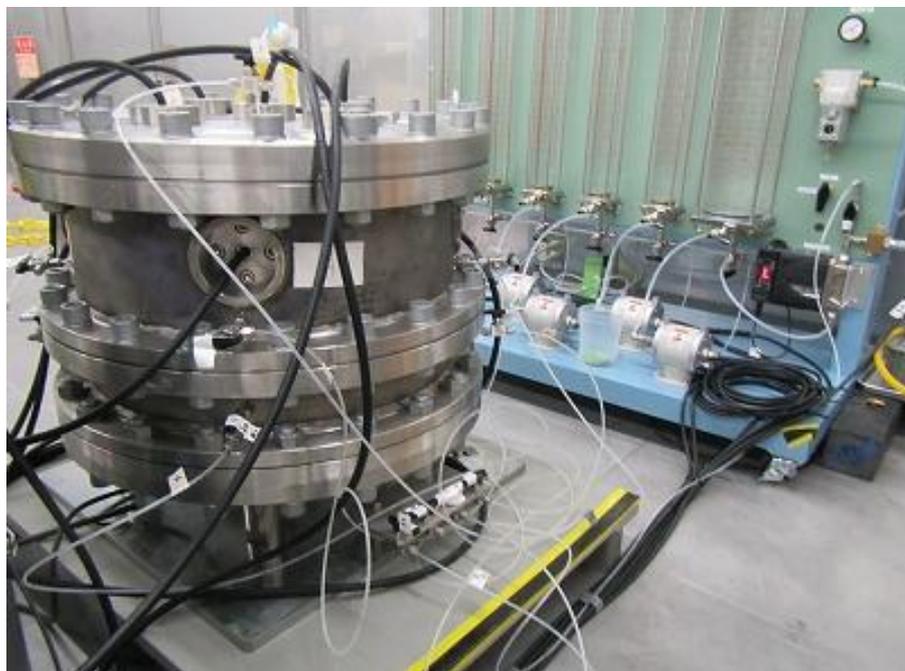
目的に向けての近年の取り組み

過去（～2017）に要素試験で取得した、人工バリア（ベントナイト材料）中のガス・水透過特性データ（二相流パラメータ）の、三次元拡大系におけるガス移行挙動評価への適用性の確認を行うとともに、再破過・自己修復現象発生時の透過特性の変化を確認する。そのために、実処分施設にて想定される透過特性への影響要因を模擬した、モックアップ試験を実施する。



モックアップ装置によるガス移行行政権

- 要素試験より取得した透過特性データ（二相流パラメータ）の、三次元拡大系におけるガス移行挙動評価への適用性の確認
- 三次元的な影響を確認できるように、実処分施設の形状的特徴を有し情報取得のための計測器設置が可能な寸法を有することと再冠水試験（試験体の飽和の確認）およびガス注入試験（ベントナイト中でのガス、水の移行挙動の確認）が、現実的な試験期間内（それぞれ概ね1年以内）で実施できることを考慮した規模で装置を構築



試験装置 高さ：550mm 幅：600mm
試験体 高さ：320mm 幅：300mm

再冠水試験～ガス注入試験における透過特性評価項目の整理

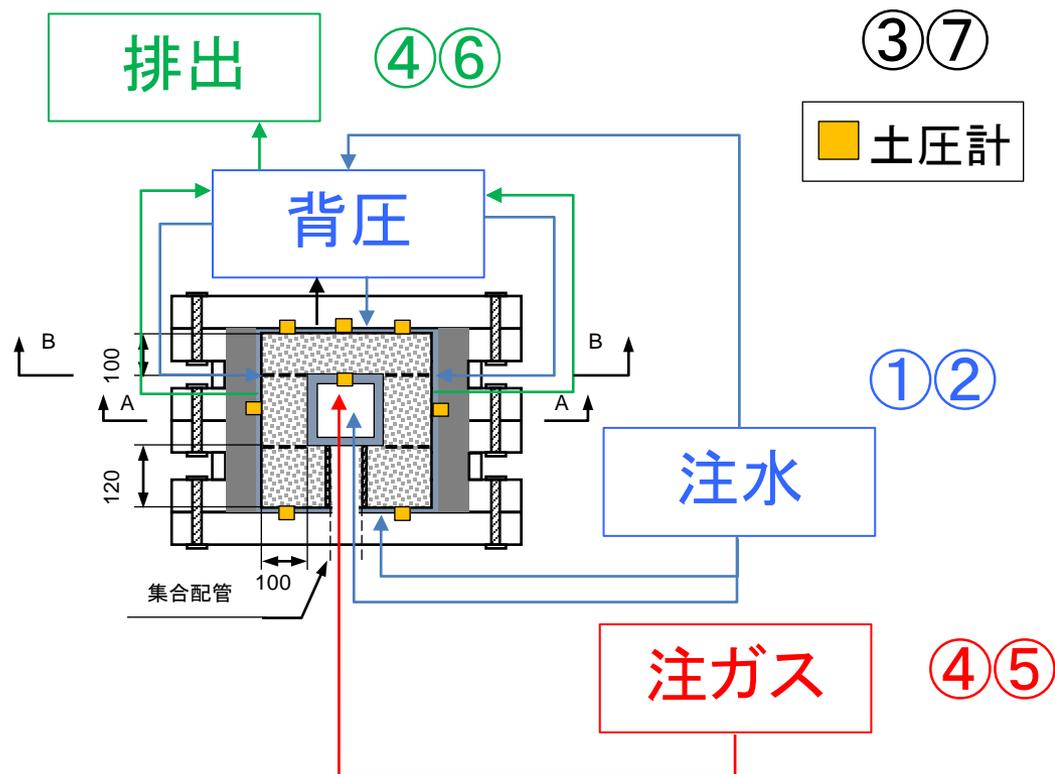
再冠水試験の評価項目

- ① 供試体への水の注水量、注水圧の経時変化
- ② 緩衝材の飽和度の経時変化
- ③ 緩衝材の膨潤圧の経時変化

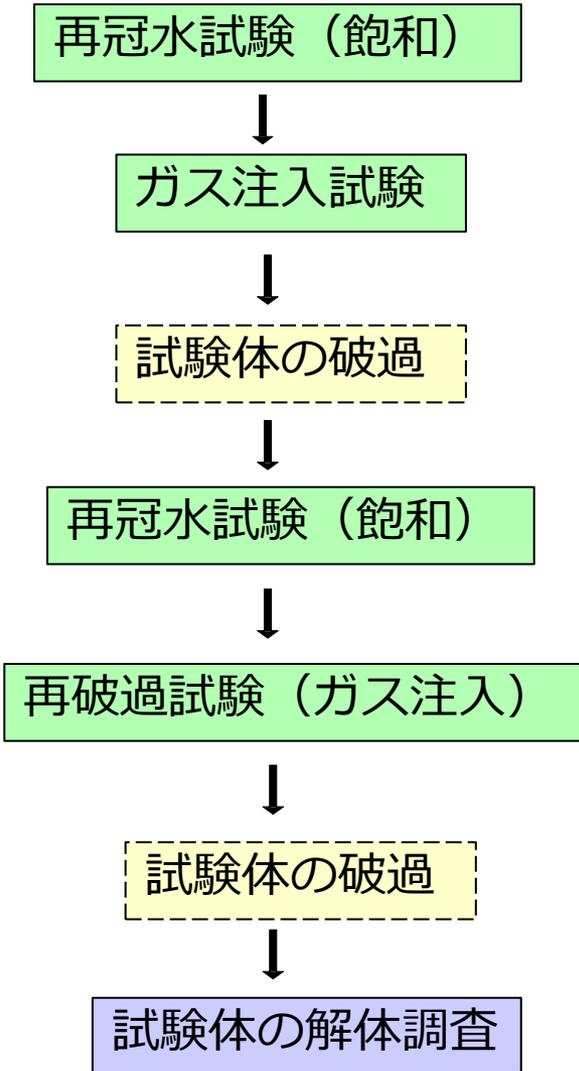
ガス注入試験の評価項目

- ④ ガス注入量、緩衝材からのガス、水の排出量の経時変化
- ⑤ 緩衝材内でのガス圧の経時変化
- ⑥ 緩衝材の飽和度の経時変化
- ⑦ 緩衝材の膨潤圧の経時変化

モックアップ試験装置は実処分施設をもとにスケールダウンした試験となっている。ガスを中央（処分施設の廃棄体エリアに相当）から3次元的に経時的に昇圧しながら放出、背圧（NFの水圧を模擬）を周囲から注水により载荷、6面全ての計測が可能のように土圧計を設置している。



モックアップ試験の実施内容



再冠水試験により、ベントナイト試験体の飽和過程における拳動把握とガス注入試験の初期状態（飽和状態）のセッティングを行う。

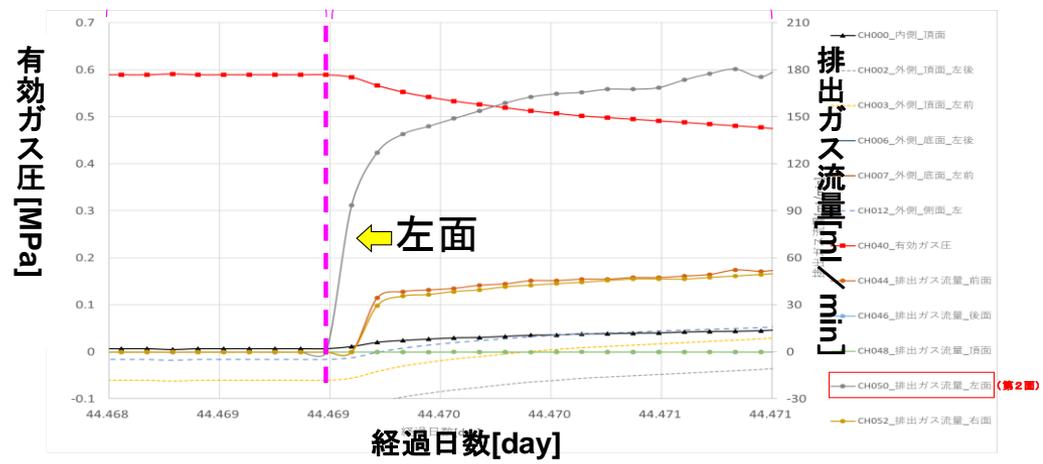
試験体の飽和を確認後、試験体へのガス注入を破過に至るまで経時的に昇圧しながら継続し、透過特性データ（気液二相流パラメータ）を取得、供試体中のガス移行拳動を評価する。

再破過試験では、一度破過を経験した供試体を再冠水させ再びガスを注入する。再冠水に伴う、ベントナイト試験体の自己修復現象の評価も実施する。

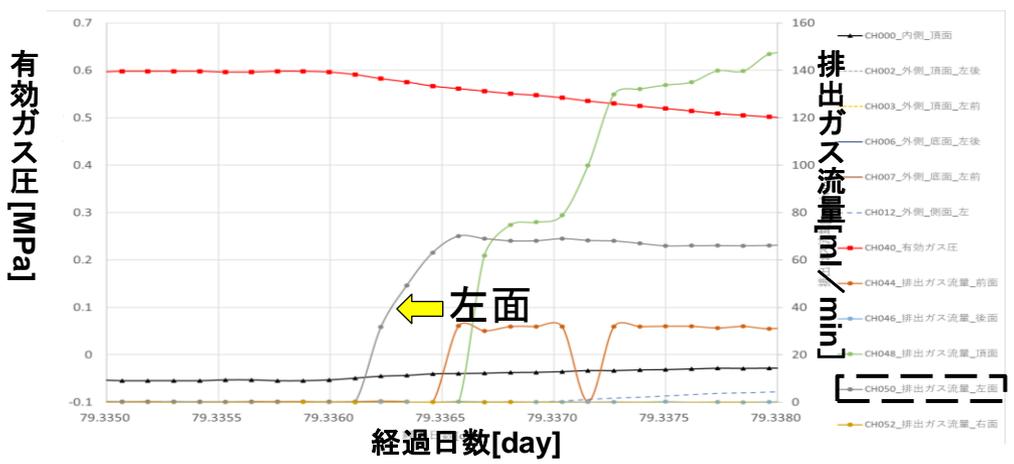
再破過後の試験体の解体調査により、破過あるいはガスの移行に伴うベントナイト試験体の状態の変化、試験体が持つ不均質性等を評価する。



ガス注入試験～再破過試験の結果（水・ガス排出挙動の変遷の整理）



一回目の試験における破過発生前後の注入ガス圧と各面からのガス排出挙動



再破過試験における破過発生前後の注入ガス圧と各面からのガス排出挙動

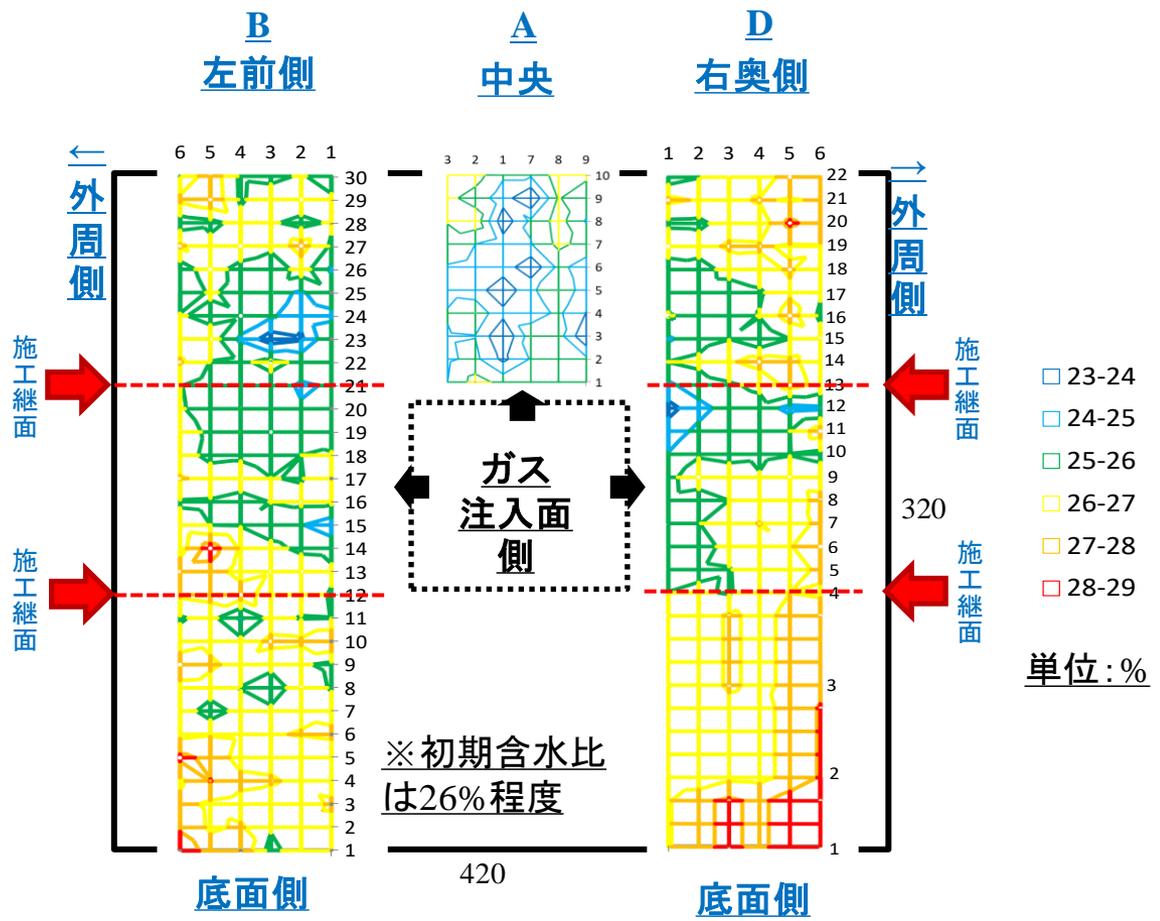
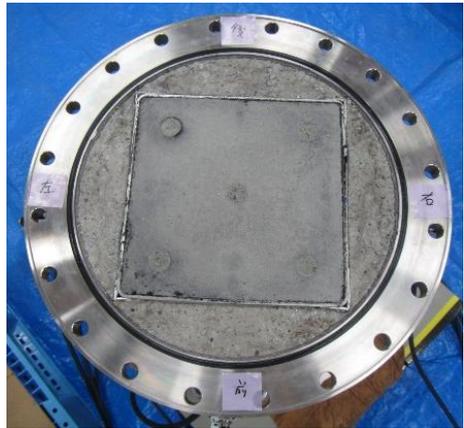
一回目の試験における試験体からの破過前後のガス排出挙動（上図）と再破過試験における破過前後のガス排出挙動（下図）より、どちらの試験においても、破過発生時に同一方向面（試験体左面）からのガス排出が卓越している。

破過現象観測時の注入ガスの有効ガス圧は、要素試験のときのガス圧よりも低い結果となった。（要素試験：1.3MPa、モックアップ試験：0.6MPa）このことから現実的なガス移行挙動の評価のためには三次元的効果を考慮する必要があるといえる。

また、モックアップ試験結果に対して、一次元要素試験から得られた透過特性値をフィッティングすることにより2相流パラメータを同定した結果、一次元要素試験で得られたパラメータより、透気しやすい傾向の2相流パラメータが得られた。

モックアップ試験体の解体調査の結果(試験体の目視観察、含水比調査)

試験体頂面を目視観察し、亀裂が存在しないことを確認。
 解体した試験体の含水比調査より、主要なガス移行経路となっていると考察した左面方向の含水比が相対的に小さくなっている。また、試験体下部の含水比は大きくなっている。このような現象は、ガスの移行により押し出された間隙水が重力（浮力）の影響で試験体下部に移動したためだと推定される。



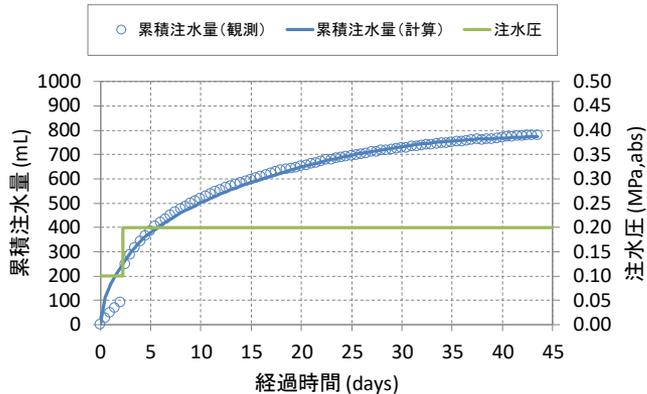
・モックアップ試験により、一次元要素試験の際には見られなかったガスや水の分布や移行挙動への三次元効果による影響が観測された。

モックアップ試験（再破過試験、解体調査）のまとめ

| | |
|----------------------|---|
| <p>ベントナイトの自己修復機能</p> | <p>○ガス注入試験（1回目）と同じガス圧で再破過したことから、一度破過したことが致命的な欠陥とならず、再飽和に伴うベントナイトの自己修復機能により透過性が回復したと考えられる。</p> |
| <p>破過の発生方向</p> | <p>○再破過試験においても、ガス注入試験（1回目）と同一の面方向から破過が発生したことから、その方向が他の方向と比較して破過が発生しやすい特性を有していたと考えられる。試験体の有する不均質性や3次元的な応力の分布に伴う透過性の違いが結果に影響していると考えられる。</p> |
| <p>含水比分布</p> | <p>○ガス注入試験の主要なガス移行経路の方向と解体調査の含水比調査の結果より、ガスの浸入により間隙水が押し出されて含水比が低下した方向から、ガス排出が発生していると考察。</p> |

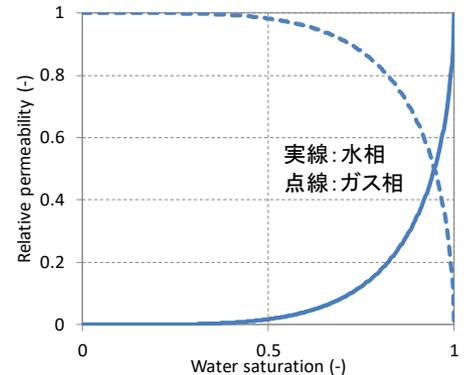
ガス移行挙動とそのモデル化

Saturation phase

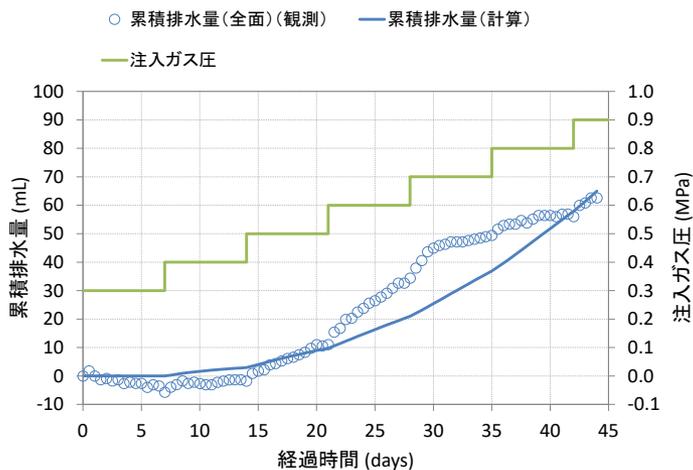


Identification of two-phase model

Relative permeability

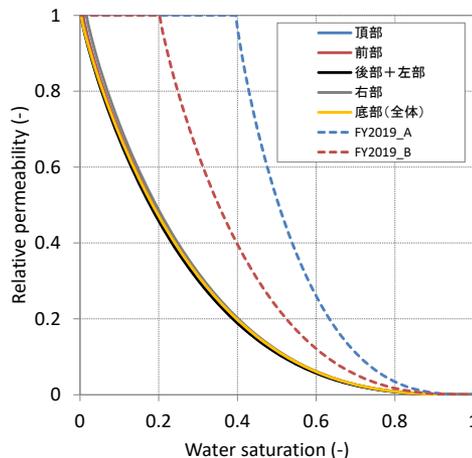


Gas injection phase

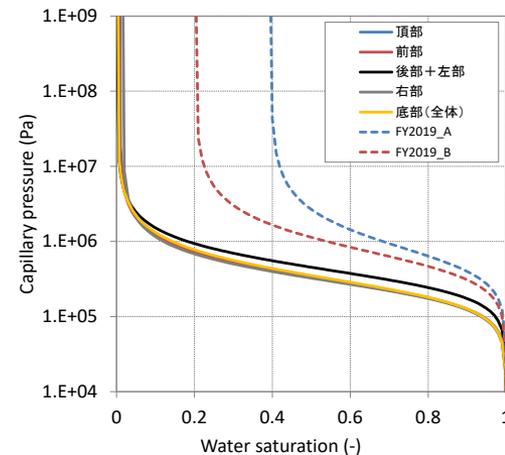


Absolute permeability : $6.36 \times 10^{-20} \sim 1.21 \times 10^{-19} [m^2]$

Relative permeability



Water retention curve



モックアップ試験結果に基づくガス移行モデルに適用する2相流パラメータの異方性については引き続き検討中。

全体のまとめ

- ◆ **TRU廃棄物（グループ2；ハル・エンドピース）処分場でのガス発生量の評価**
 - 廃棄体1体当たりの放射線分解によるガス発生量は金属腐食によるものよりも多いことが見込まれる。
- ◆ **廃棄体パッケージ充填材を対象としたガス発生量の低減対策**
 - セメント系材料の放射線分解による水素ガスの発生量は、セメントや骨材の種類、配合の違いによらず、自由水量と相関があることが明らかになった。
 - このことから、セメント系充填材製作の乾燥工程において自由水量を減らすことで水素ガス発生量の低減が可能である。
- ◆ **人工バリアのガス移行挙動とそのモデル化**
 - （従来の要素試験に基づく）ガス影響評価からガス発生やそれによるベントナイト自己修復性が線量率のピークに影響することが示唆され、より精度よいガス移行モデルの構築が必要。
 - モックアップによるガス移行試験により、1次元要素試験に比べ破過圧が低くなることやガス相と水相の3次元的な移行挙動を確認した。2相流モデルの異方性やこのモデルに基づくガス影響評価は今後実施する予定。また、再破瓜試験では、再飽和によるベントナイト材料の自己修復性を確認した。

ご清聴ありがとうございました



放射性廃棄物地層処分における長期の地下水動態評価に係る地下水年代測定技術の最近の進展

(Recent Progress in Groundwater Dating Techniques for Assessing Long-Term Groundwater Dynamics in Geological Disposal of Radioactive Waste)

電力中央研究所

(Central Research Institute of Electric Power Industry)

中田 弘太郎*

Kotaro Nakata

長谷川 琢磨

Takuma Hasegawa

 電力中央研究所

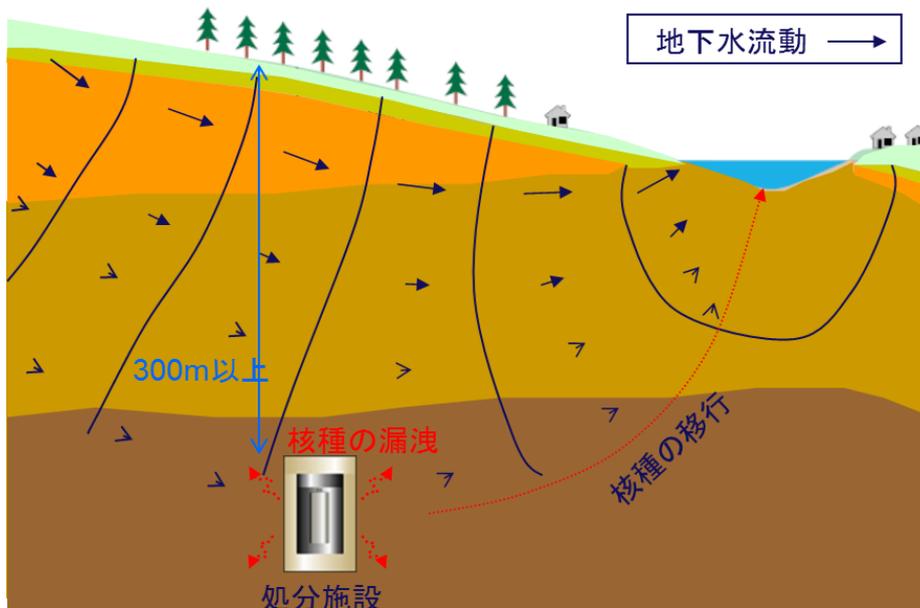
本日発表の内容:Contents

- ◆ 研究の背景 : Background of our research
- ◆ 地下水年代とその測定原理 : Groundwater dating and the principals
- ◆ 適用事例 : Recent case study
- ✓ ^{81}Kr による年代測定 : Groundwater dating with ^{81}Kr
- ◆ まとめ : Summary

◆ 研究の背景 : Background of our research

背景: Background of the research

◎ 地層処分概念: Concept of Geological Disposal



- 人間の生活圏から遠ざける
Keep them away from human beings
- 多重バリアシステム: 人工+天然バリア
Multi barrier systems



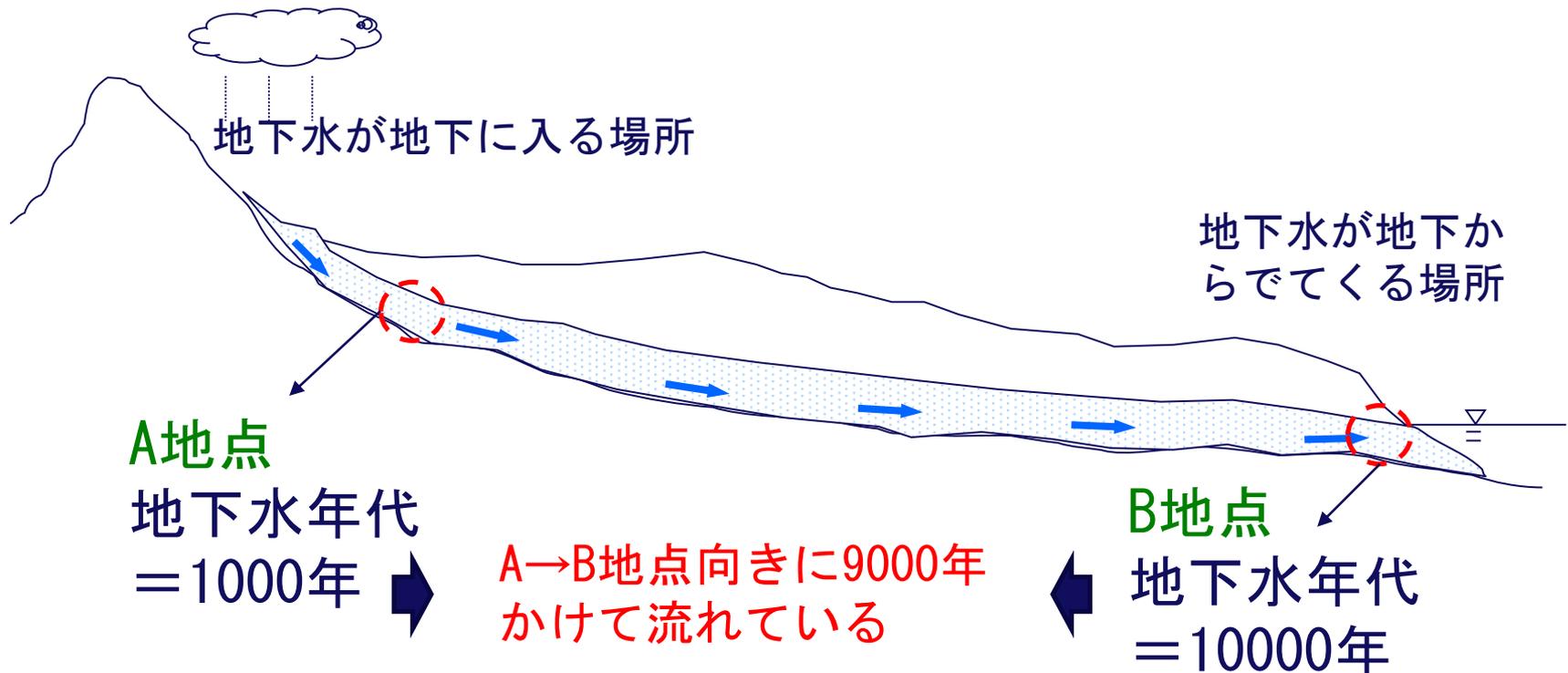
人間の生活圏にでてこない、出てきたときには無害化(減衰)している

◎ 人間が影響を受ける可能性: Possible Scenarios

- 地層の隆起で処分場が地表付近に
- 多重バリアシステム: 人工+天然バリア
- 核種が地下水に溶出、地下水の流れとともに人間の生活圏へ: Groundwater Scenario

地下水年代とは？ What is groundwater age ?

地下水の年齢：地下水が地下に入ってから時間→「**地下水年代**」
 Groundwater age: the residence time of GW since recharge



地下水年代の分布：広域・長期間での地下水の流れる方向・速度を推定できる重要な情報になる

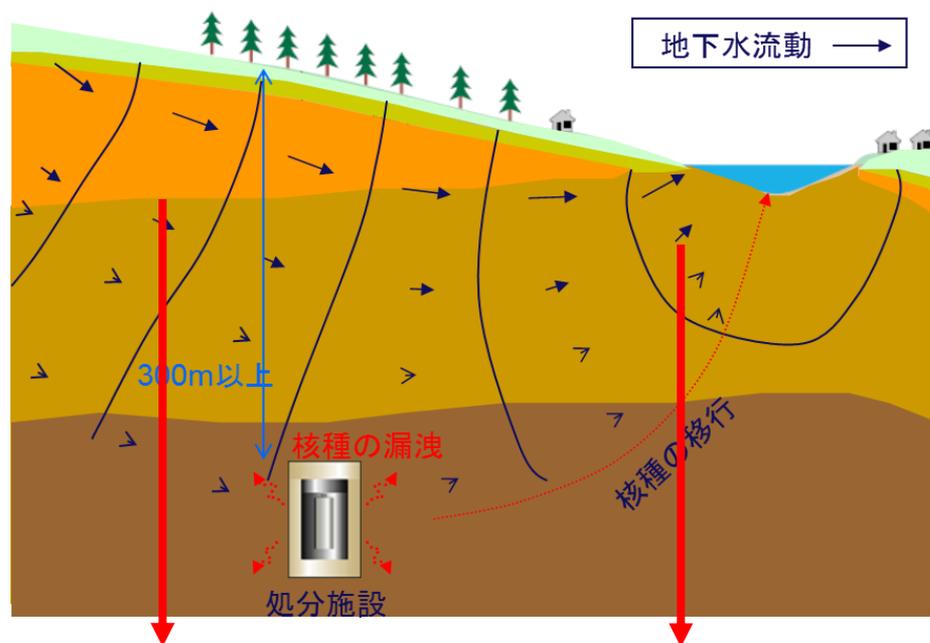
Groundwater age can provide useful information about direction and flow rate of regional GW during long period

地下水年代の廃棄物処分への利用

Use of groundwater age for HLW disposal

◎ PAの醸成: Forming of public acceptance

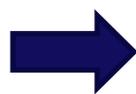
◎ モデル評価への適用: Application for model calibration



直感的に地下水が動きにくいことを理解
We can “feel” groundwater is old

長期・広域の地下水流動を理解
The regional flow of groundwater during the long period can be assumed from age of groundwater

Point A
: 10,000 Year



Point B
: 50,000 Year

Point A to B

◆ 地下水年代とその測定原理 : Groundwater dating and the principals

地下水年代をどのように評価するか？

How to evaluate the groundwater age?

地下水の年代の推定方法

- ◆ 地下で増えるものを利用：ヘリウムガスなど

Use of something increase in subsurface

- ◆ 地下で減るものを利用：天然の放射性核種

Use of something decreases in subsurface

- ◆ 過去の気候変動なども利用できることも

Other methods: Use of paleo-climate etc.

地下中で増えていくものを利用

Use of something increase in subsurface

代表例: ヘリウムガス (Representative example Helium)

ヘリウムガスとは？

- ・特性(characteristics): **他の物質と反応しない**(chemically inert)
- ・発生(origin in subsurface) : **岩石に含まれるウラン/トリウムの反応から発生**(generated from reactions of U and Th)

➡ **古い地下水ほどHe濃度が高くなる**、年代が古いほど分析が容易

The concentration of He increase with increase of groundwater age



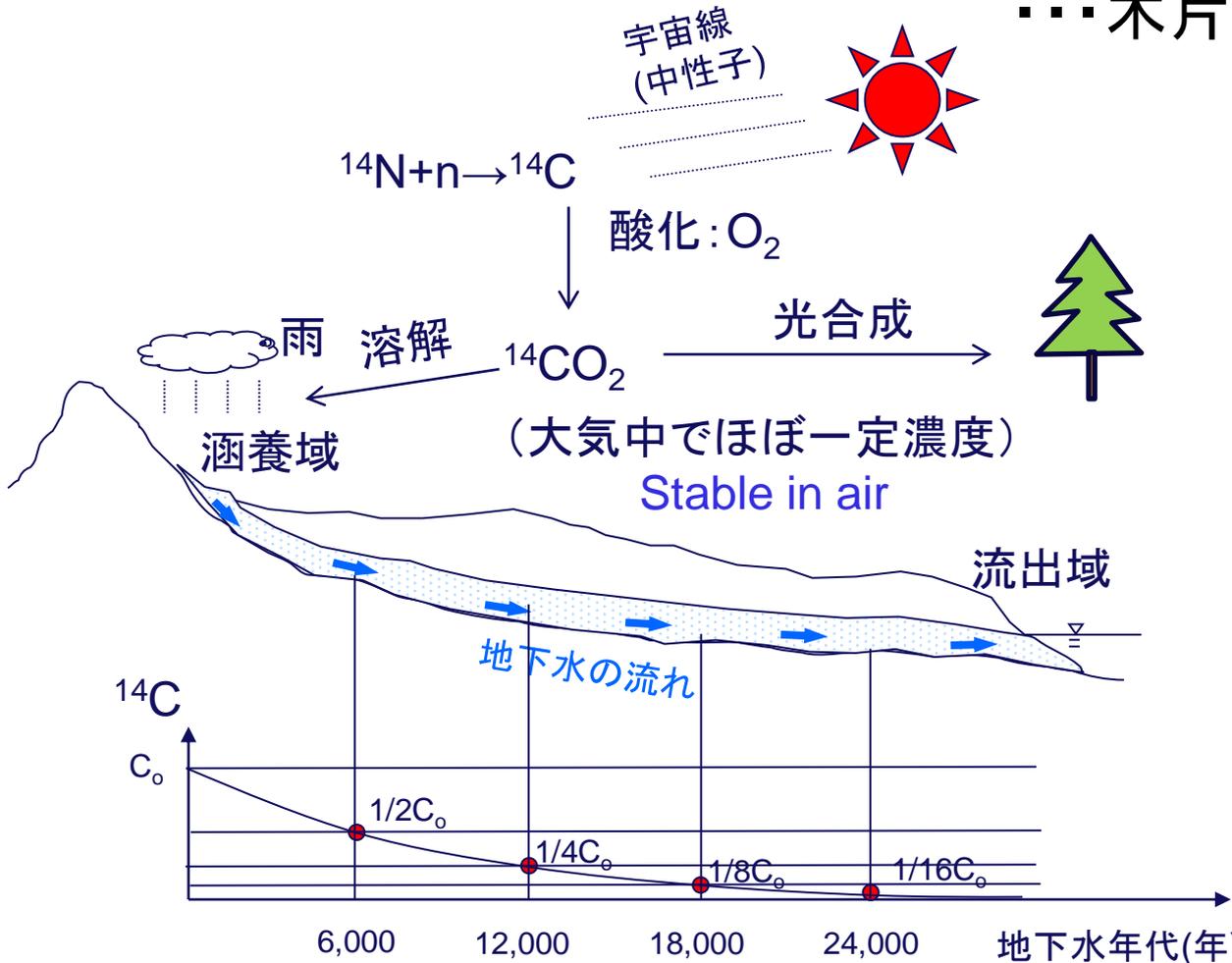
地下水のヘリウム濃度、岩石からのヘリウムの発生速度がわかれば、地下水年代を推定できる

Groundwater age can be estimated from concentration of He in GW and U and Th concentrations in rocks

地下水年代の評価方法：減っていくもの Use of something increase in subsurface

例：天然の放射性核種 (^{14}C ・ ^{81}Kr など)

…木片の年代測定等で有名



大気中の放射性核種
→宇宙線による生成と崩壊がバランス

^{14}C stable in air



地下中の放射性核種 → 生成がなく、「半減期」に従ってなくなる

^{14}C decreases according to half-life in subsurface

濃度と半減期から年代を推定できる (age can be estimated from concentration and half-life)

3~4半減期くらいが適用限界

地下水年代の評価方法: そのほか

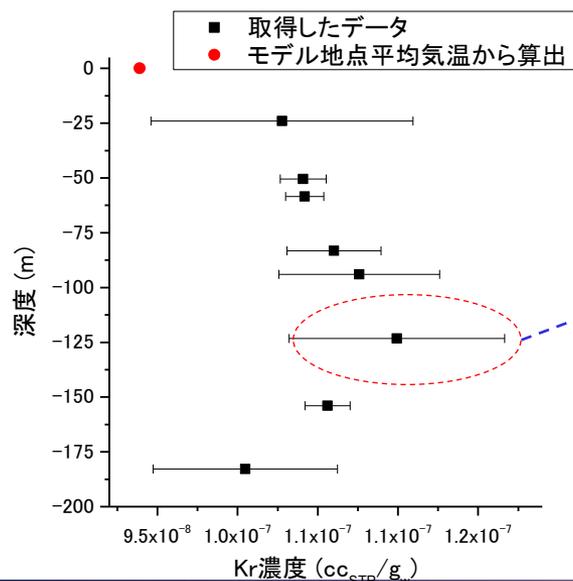
Other methods

例: 昔の気候変動を利用 Use of Paleo climate

- ・気温が低い: 水にガスが**溶けやすい**
 - ・気温が高い: 水にガスが**溶けにくい**
- 冷蔵庫のコーラ
vs 室温のコーラ



ガスの濃度が高い箇所は、気温が低いときに地下に入った水である可能性
High concentration of gases may be caused by low temperature



(例)ある地点でのクリプトン濃度の深度方向分布(左図)

深度125m付近の地下水は気温が低いときに地下に入った



氷期がもっとも盛んだった**18000年程度前**の地下水であると推察できる

適用事例: Recent case studies

✓⁸¹Krによる年代測定: Groundwater dating with ⁸¹Kr

^{81}Kr の特徴

Characteristics of ^{81}Kr

◎ ^{81}Kr の特徴(その1)

・放射性希ガス: 化学的反応性低い

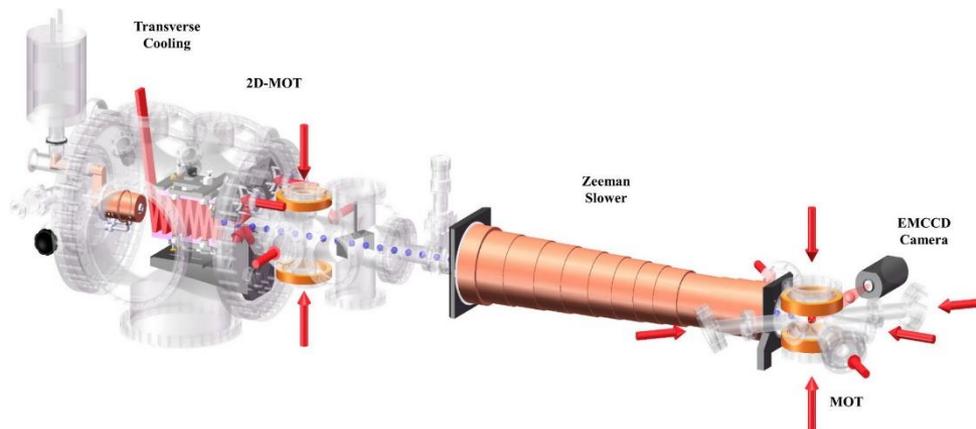
Radioactive noble gas: it is not involved in geochemical reactions

・半減期: 22.9万年→10~100万年程度の地下水年代評価可能

Half-life 2.29×10^5 years: it can be used for dating for 1×10^5 to 1×10^6 years

・近年分析手法の開発により、現実的なサンプル量で分析が可能となった

Development of measurement method allows us to measure ^{81}Kr with relatively small amount of sample



引用: UTSCホームページ

Atom Trap Trace Analysis (ATTA)

アメリカ・中国・オーストラリアの研究機関で分析可能

It can be conducted in US, China and Australia

^{81}Kr の有用性 Usefulness of ^{81}Kr

◎ ^{81}Kr の特徴(その2)

- ・地表では発生源があるが、地下では発生源が(ほとんど)ない
Production of ^{81}Kr is almost negligible in subsurface

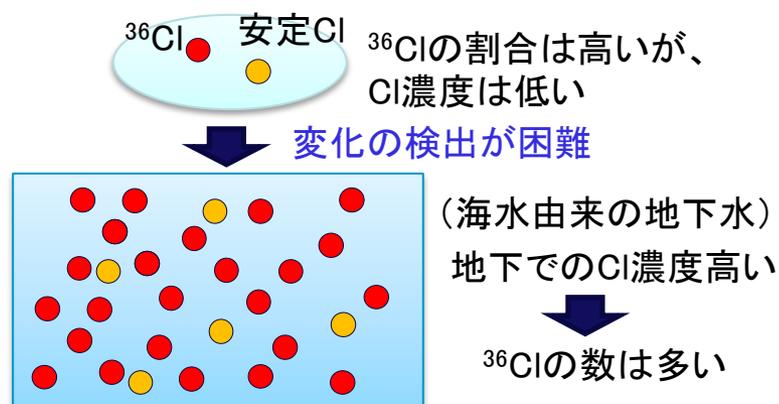


地表の水・若い地下水浸入の指標となる

^{81}Kr can act as an indicator of intrusion of surface/young water

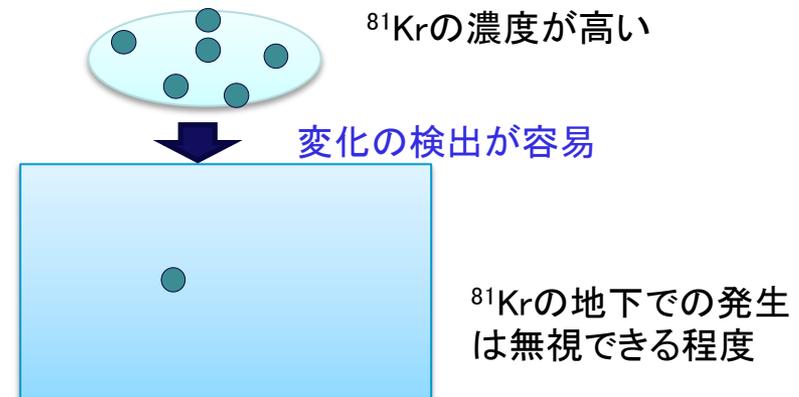
^{36}Cl の場合:

わずかに地下で発生源あり



^{81}Kr の場合

地下での発生源無視できる



^{81}Kr の利用(日本での課題) Use of ^{81}Kr (Issues in Japan)

- ◆ 日本では地下水におけるメタン濃度が高いケースがある
Concentration of methane is sometimes high in Japan
- ◆ メタンによりKrの濃度が薄まっている→大量のガスが必要
Concentration of Kr is diluted by methane
- ◆ メタンにより分析機関への送付が難しくなる
High concentration of methane makes the transportation difficult



地下水から抽出したガスからメタンを除去し、Kr濃度を高める
技術を開発させる必要がある

Development of removal method of methane from gas
samples is required

メタンの減量方法の検討 Removal method of methane

3つの手法の検討

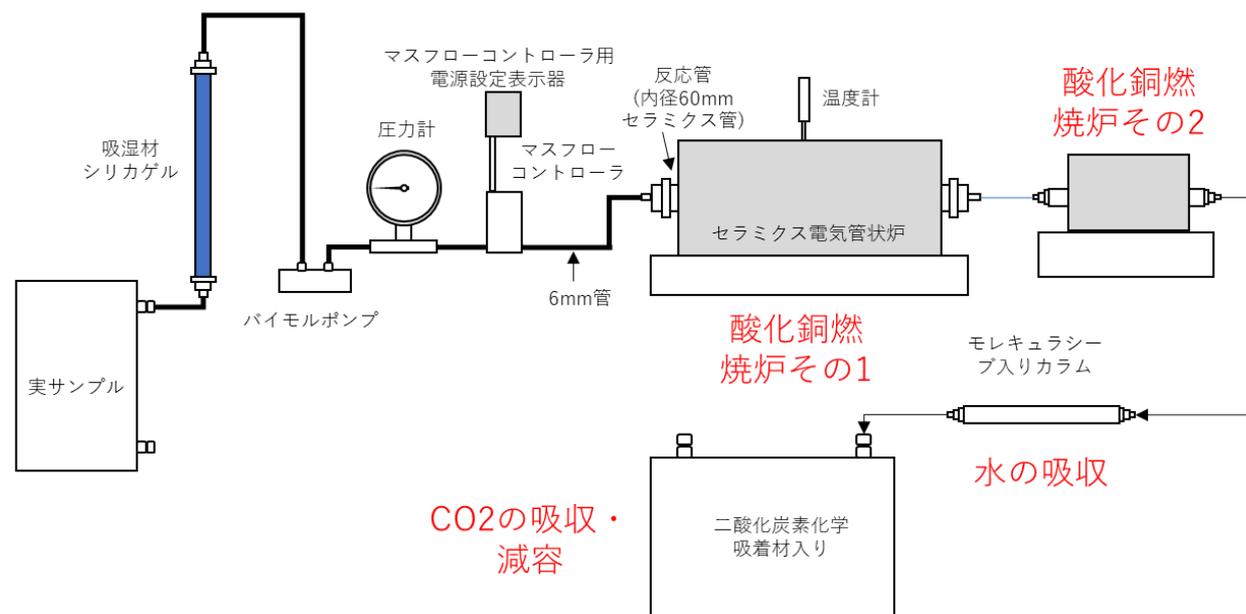
Development of removal method of methane is required

| 手法 | 利点(merit) | 欠点(demerit) |
|---|---|---|
| メタンの酸化 Oxidation of methane | 詳細はこのちほど (Mentioned later) | 二酸化炭素・水を除去する必要 H ₂ O and CO ₂ have to be removed |
| チタンへの吸着 Sorptions of methane on titanium | 多くの反応性のガスを除去できる Many kinds of gases can be removed | 真空度が上がる分、コンタミしやすい。チタン表面状態の制御が難しい (High vacuum results in contamination. Controlling the surface conditions of Ti is difficult) |
| 冷却トラップ Sorptions on cold trap | 高温での加熱が不要 High temperature is not required | 回収率低い Low recovery |

メタンの減量方法の検討 Removal method of methane

メタンの酸化→トラップ法

Development of removal method of methane is required



- ❑ 酸化銅燃焼炉 (combustion furnace): メタンを二酸化炭素と水に酸化
- ❑ モレキュラーシーブ (molecular sieve): 水をトラップ
- ❑ 二酸化炭素吸収剤入りガスバッグ (gas bag with CO₂ absorber): 二酸化炭素をトラップ

メタンの減量方法の検討 Removal method of methane

【北海道幌延地域のガスへの適用例

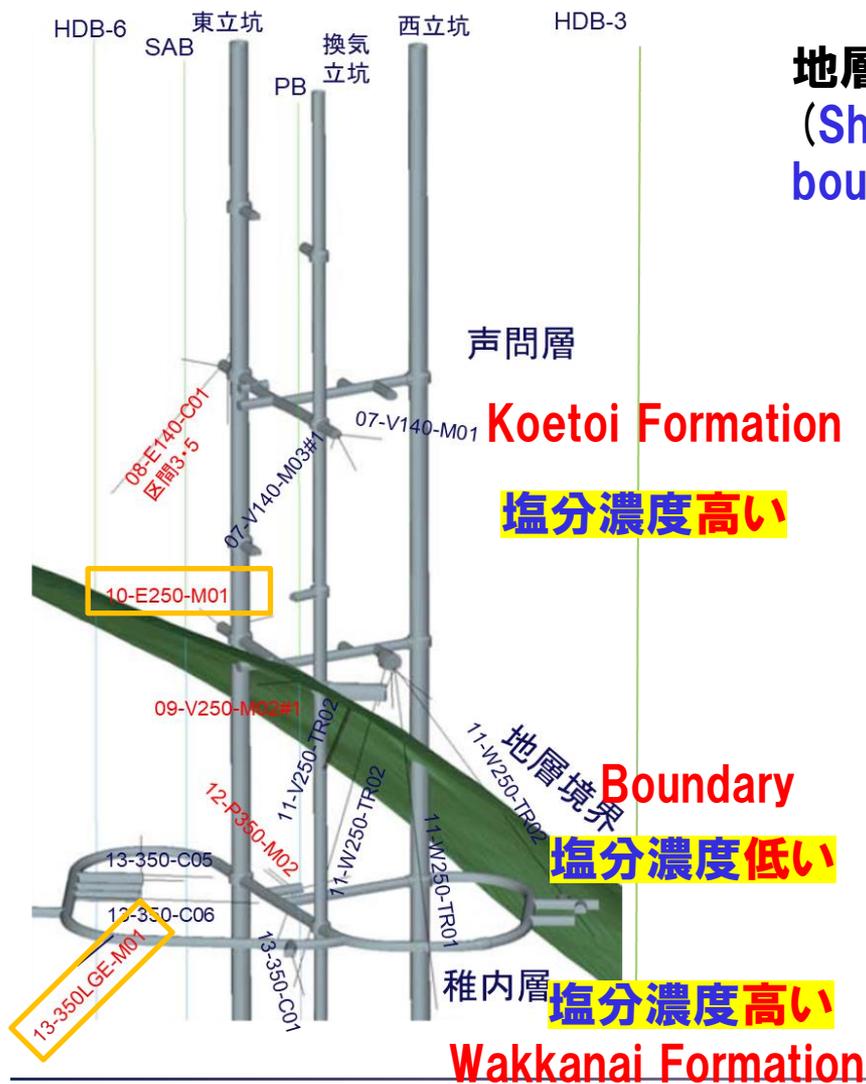
(Application to gases obtained in Horonobe, Hokkaido)

| サンプル (Sample) | | 容量 | ガス濃度(%) Concentration | | | | | Kr濃度 (ppm) |
|------------------|---------------------|-------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| | | | H ₂ | O ₂ | N ₂ | CH ₄ | CO ₂ | |
| 13-350LGE-M01 | Before treatment | 40L | 0.0 | 0.6 | 2.6 | 89.4 | 5.9 | 0.04 |
| | After treatment | 0.46L | 0.0 | 51.0 | 48.6 | 0.1 | 0.4 | 3.06 |

92%

- 主要成分(Main component) : メタン(Methane) → 窒素(N₂)
 - サンプルの体積(Volume of sample) : 40L → 0.46L
 - Kr回収率が高い (high Kr recovery) → CO₂がキャリアの役割 (CO₂ acts as carrier gas)
-  **輸送が容易**
 Be transported easily
-  **貴重なサンプルの損失がない**
 (We do not lose important samples)

幌延地域への適用 Application to groundwater in Horonobe

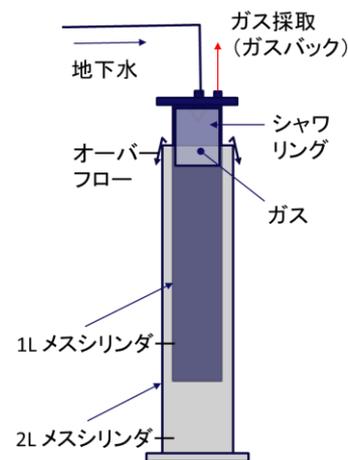


地層境界を浅層地下水が流れている可能性
(Shallow groundwater may flow through the boundary)



- 250m(地層境界付近) で、ガスを採取*し、
- 350m(稚内層) ^{81}Kr を分析

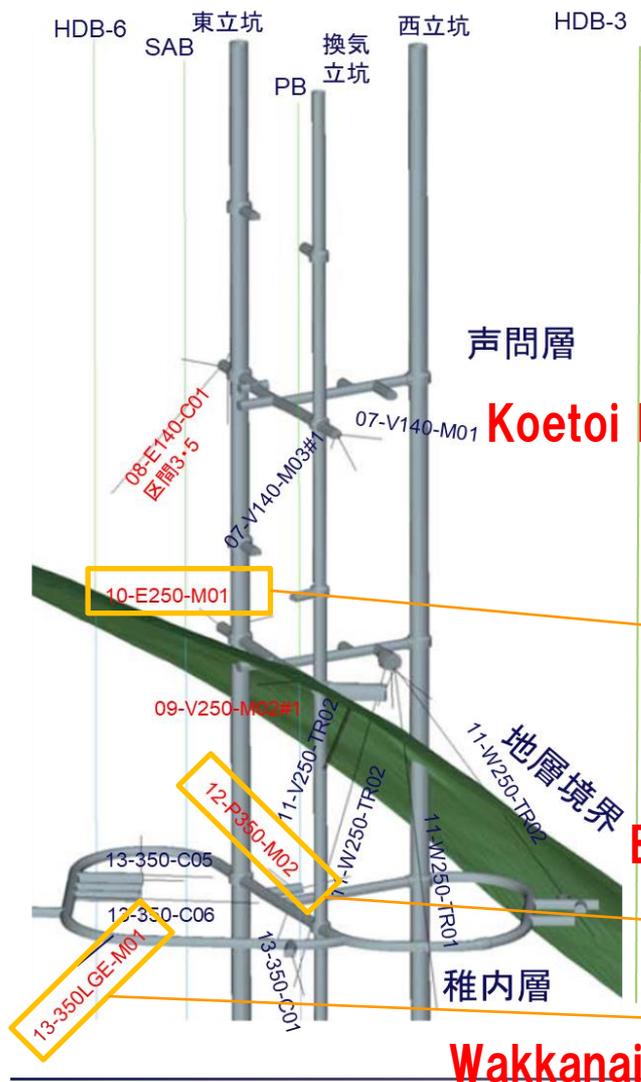
Gas was obtained and ^{81}Kr was measured after the treatment at the depth of 250 and 350m



ガス採取装置の概念図

Schematic view of “water displacement method” for obtaining the gases from groundwater

幌延地域への適用 Application to groundwater in Horonobe



^{81}Kr の分析結果

Results of ^{81}Kr measurements

250mにおける ^{81}Kr 濃度
81Kr at 250m

12.6 pMKr

350mより顕著に
大きい
Significantly
larger than that
at 300m

300mにおける ^{81}Kr 濃度
81Kr at 300m

0.2 pMKr

ゼロに近い
Close to 0

2.5 pMKr

メタン濃度が高くて古い
地下水では $^{81}\text{Kr}=0$ を確認

^{81}Kr まとめ Summary of ^{81}Kr

- ◆ ^{81}Kr の特性: その性質から、天水浸入の指標として有効
 Characteristics of ^{81}Kr : It can provide information about intrusion of surface/young groundwater
- ◆ 現時点での課題: メタンにより分析機関への安全・確実な輸送が阻害される可能性がある→メタンを低減し、Kr濃度を高める手法を開発
 Methane can be a big issue for safety transportation and measurement of ^{81}Kr → The method that can reduce the amount of methane has been developed
- ◆ 幌延地域の地下水への適用: 250mに比較的若い地下水が流れ込んだ可能性を示唆(Cl濃度等と合致: 更なる検討必要)
 Application to Horonobe groundwater : The results indicated young groundwater may flow into 250m (further investigation is required)



日本の地下水で ^{81}Kr を適用し、年代評価ができることを確認した
 It was confirmed that ^{81}Kr can be used as a tracer of groundwater age

まとめ Summary

- ◆ 地下水年代：長期・広域の地下水流動に関する情報・解析結果の妥当性検証に有効

Groundwater age can provide useful information about regional flow of groundwater during long period: it can be applied to calibration of flow model

- ◆ 地下水年代：地下中で増えていくもの、減っていくものに着目し、地下水の年を評価する手法

Groundwater age is estimated from something increase/decrease in subsurface

- ◆ 最新の事例 (^{81}Kr の利用) : ^{81}Kr は天水由来の地下水の浸入評価に有効。メタンを除去し ^{81}Kr を分析する手法を開発→幌延地域での有効性を示した

Recent case study (use of ^{81}Kr) : ^{81}Kr can indicate the inclusion of young groundwater into old one. The method for removing methane from gas samples has been developed → ^{81}Kr has been applied to groundwater in Hornobe area

謝辞

- ◆ここで発表した成果は経済産業省からの受託事業「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発(令和3年度))」において得られたものである。
- ◆サンプル採取等において、JAEAの宮川和也氏に多大な貢献をいただいた。

Numerical assessment of a hybrid approach for simulating three-dimensional flow and advective transport in fractured rocks

Chuen-Fa Ni, Ph.D., P.E.

Professor & Director

**Center for Environmental Studies, National Central University
Graduate Institute of Applied Geology, National Central University**



國立中央大學 環境研究中心
Center for Environmental Studies

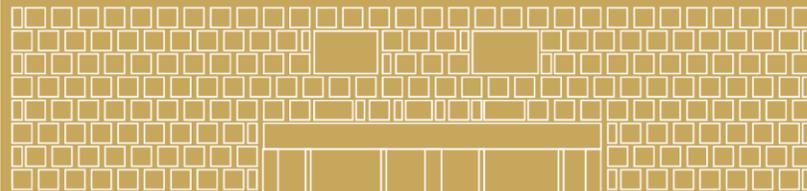


Quote:

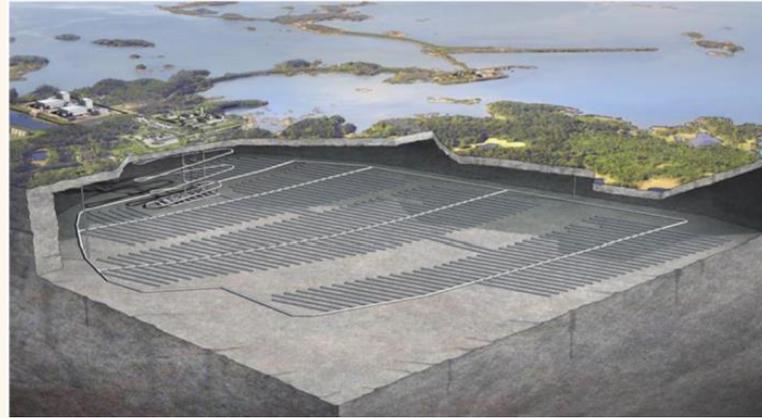
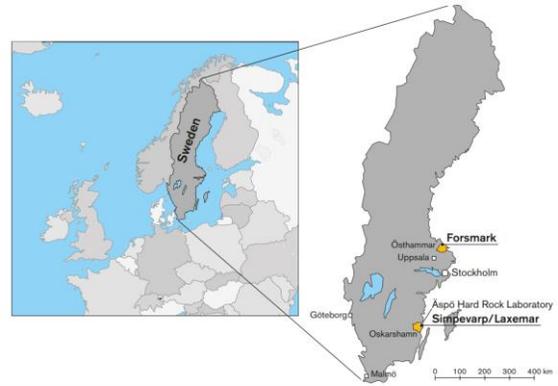
In God we trust, all others must bring data.

If you don't know how to ask the right question, you discover nothing.

-- William Edward Deming (October 14, 1900 – December 20¹, 1993)

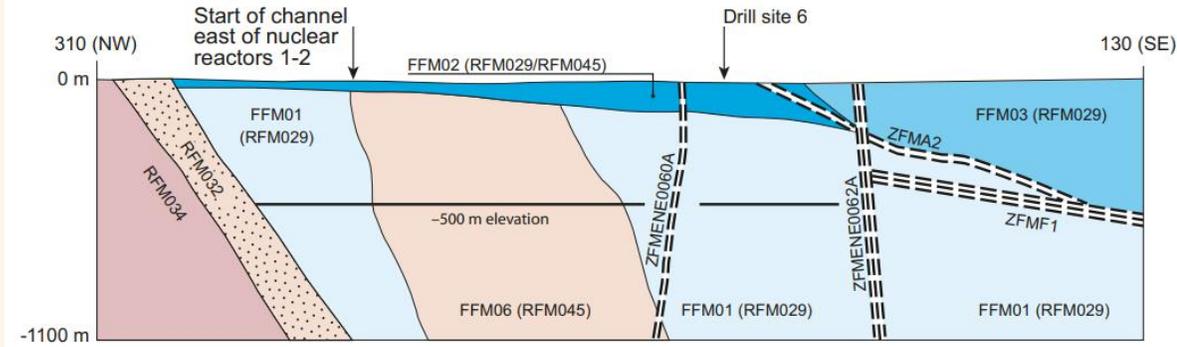


Key issues

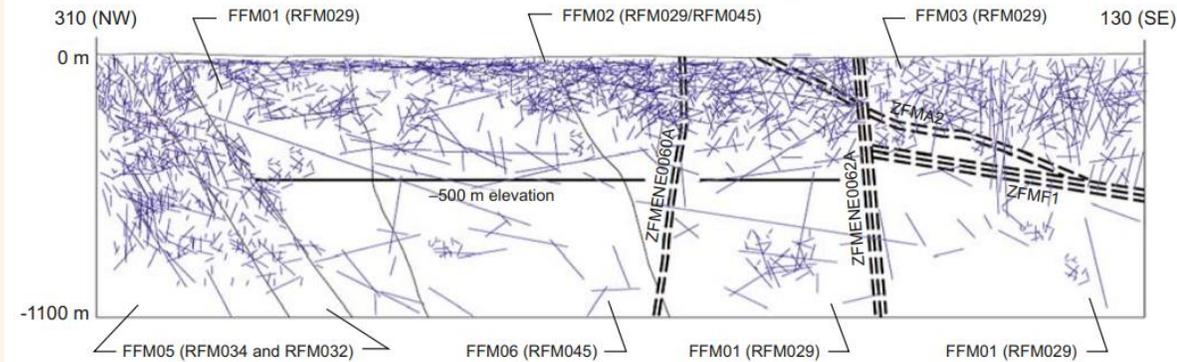


(Andersson, 2020)

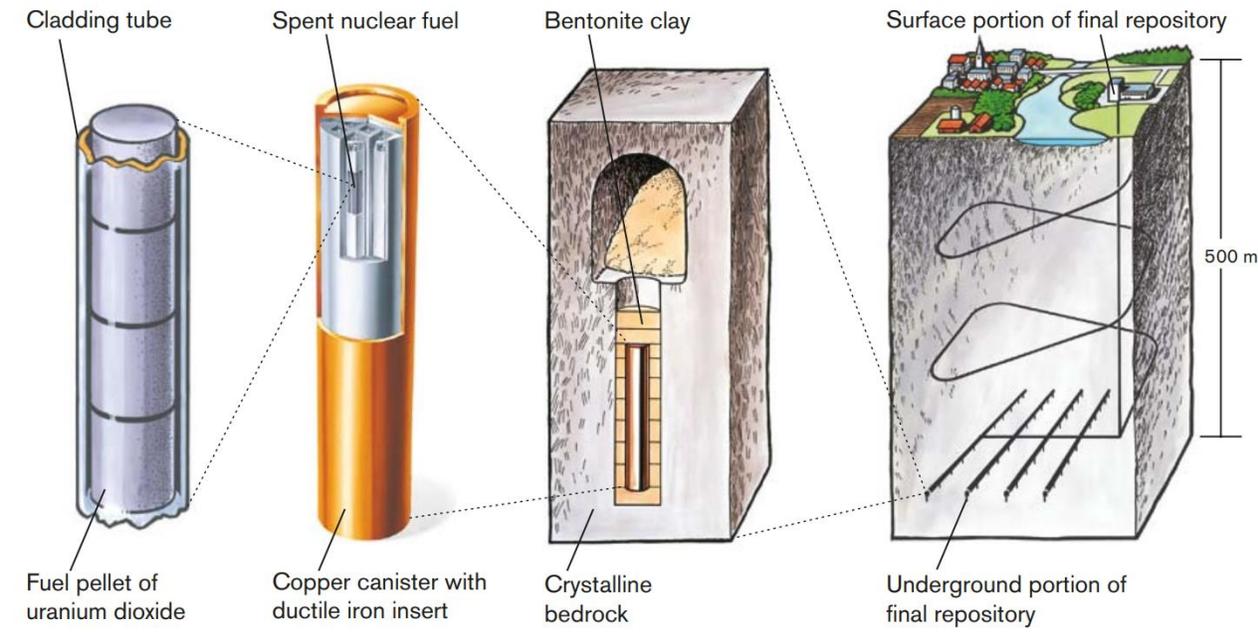
Conceptual fracture domain model



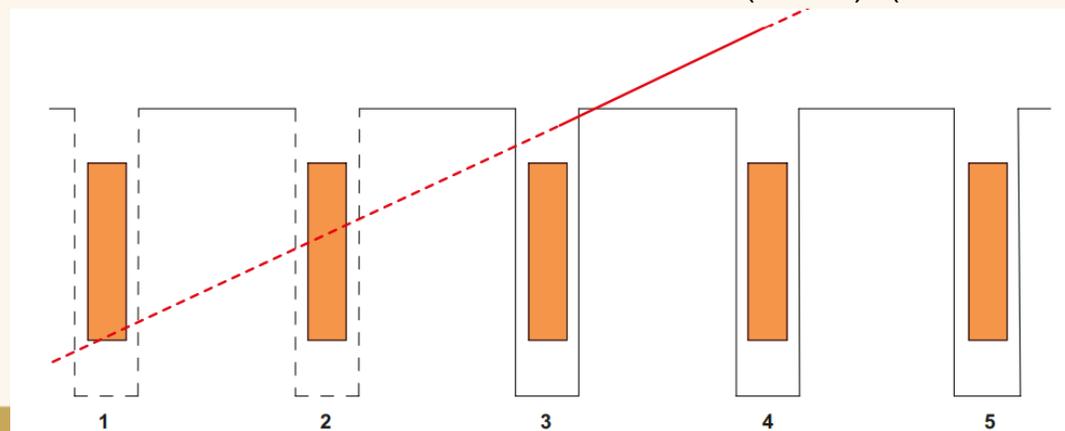
Conceptual hydrogeological DFN model (connected open fractures)



The KBS-3 concept for disposal of spent nuclear fuel (SKB, 2011)



Fractures are not allowed to intersect deposition holes in accordance with the Extended Full Perimeter Intersection Criterion (EFPC). (Munier 2006)



Challenge with scale interactions

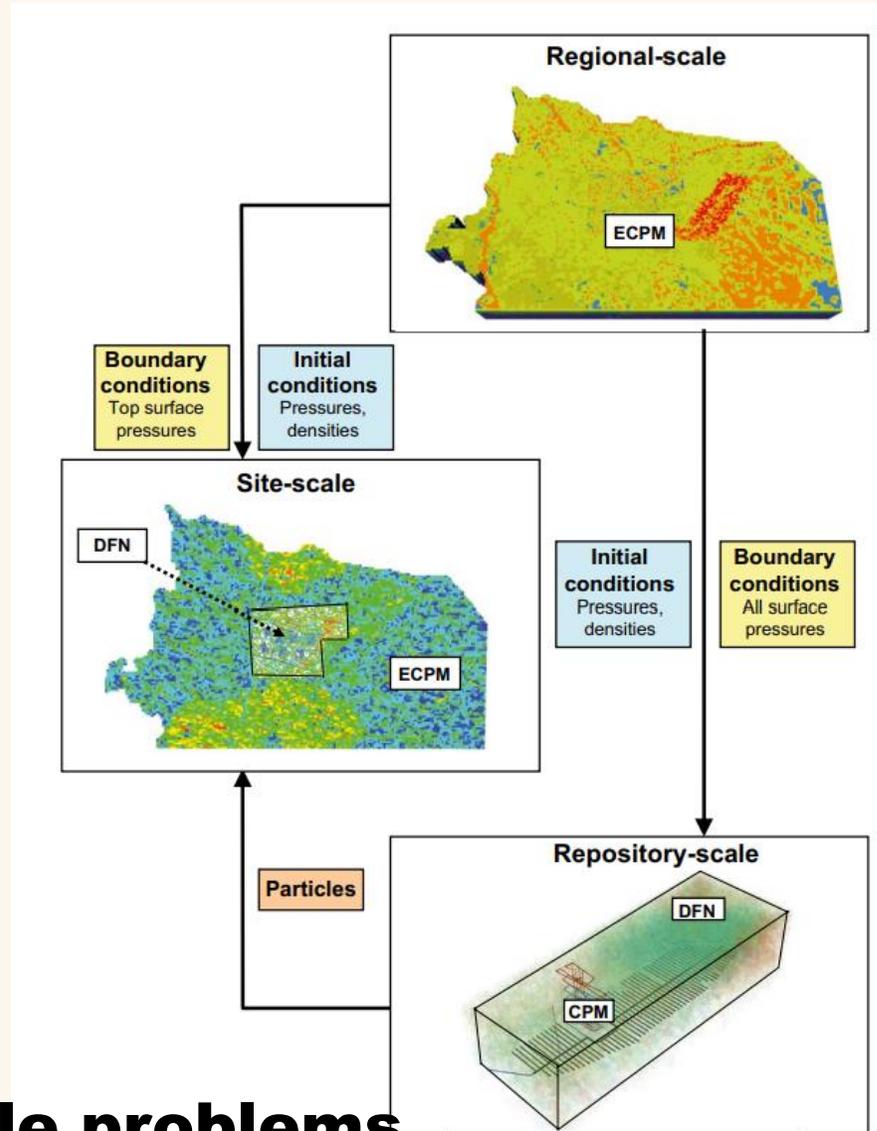
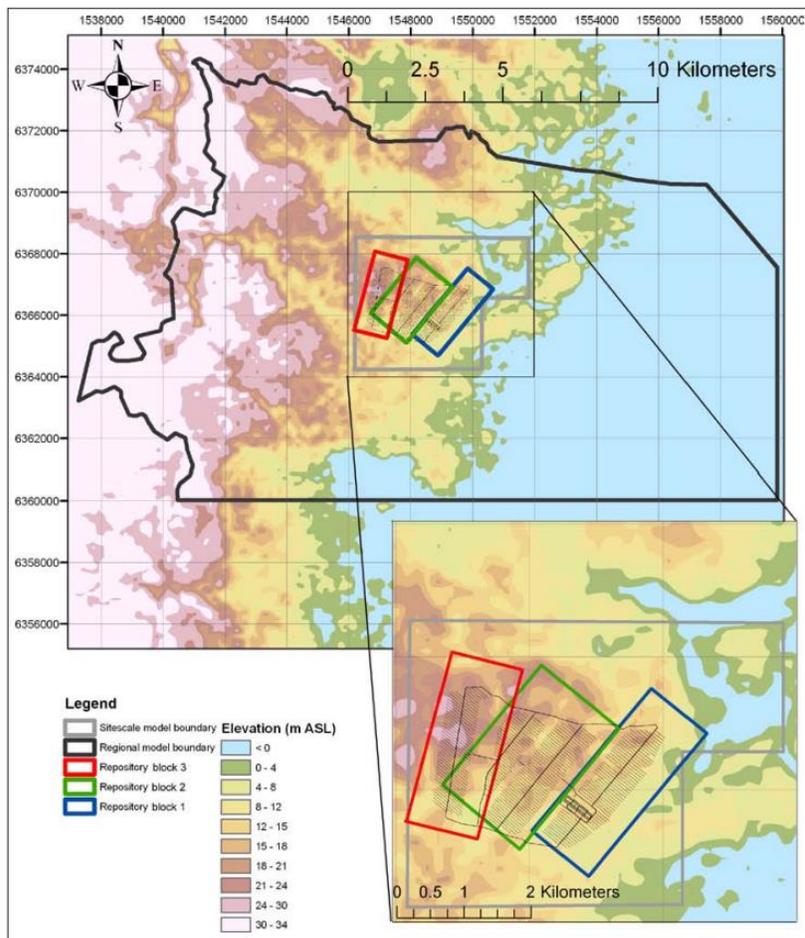


Figure 3-10. Illustration of the concepts of model scales, embedding, and the transfer of data between scales. Models are defined by hydraulic conductivity (CPM/ECPM) or transmissivity (DFN).

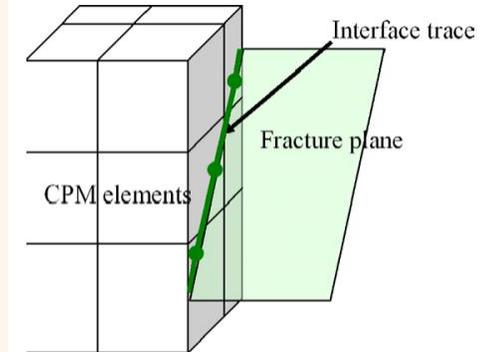


Figure 3-6. Illustration of embedding between DFN and CPM sub-models. A finite-element CPM mesh is shown on the left. The right hand surface is intersected by a single fracture plane. Extra equations are used to link the DFN to the CPM.

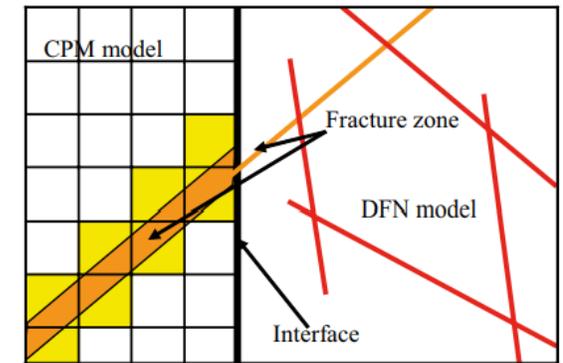


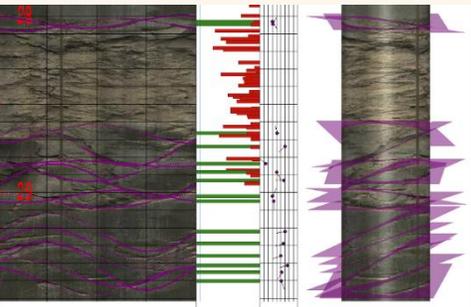
Figure 3-18. Schematic illustration of continuity of DZs across a CPM/DFN interface in a ConnectFlow model. The DFN region is to the right with a CPM grid to the left.

**Models for multiple scale problems.
From fractures to regional-scales**

(Joyce et al., 2010)

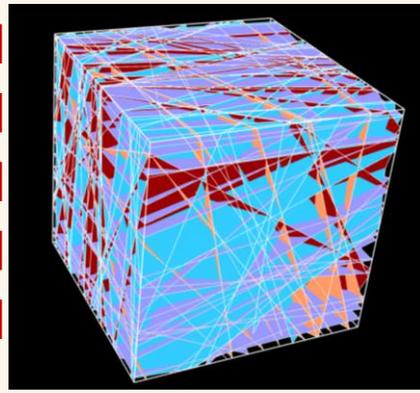
Flow & reactive transport modeling

Our previous approach!



Input data

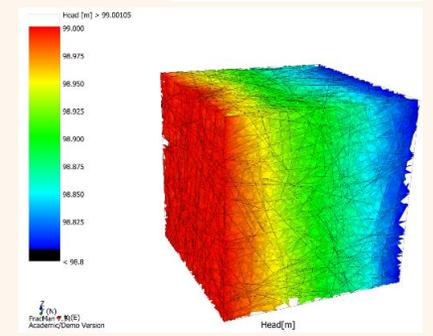
Fracture data analysis



Generation of DFN

Mesh generation

Flow simulation

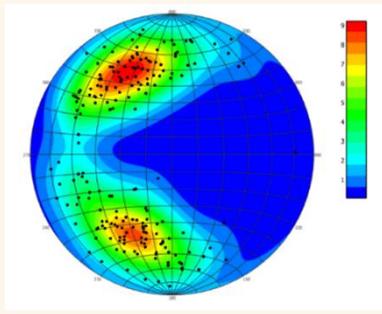
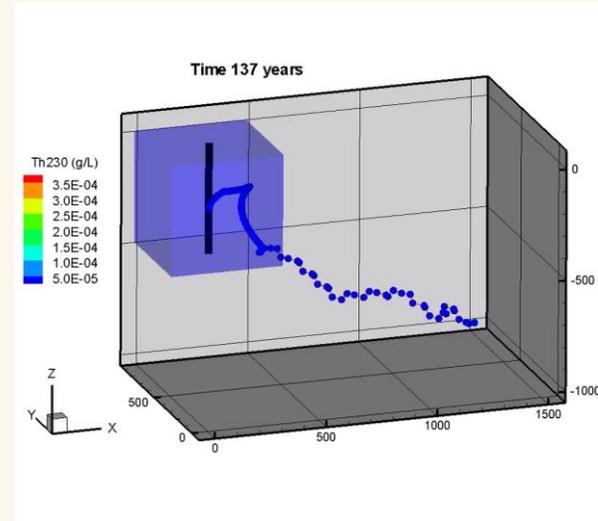
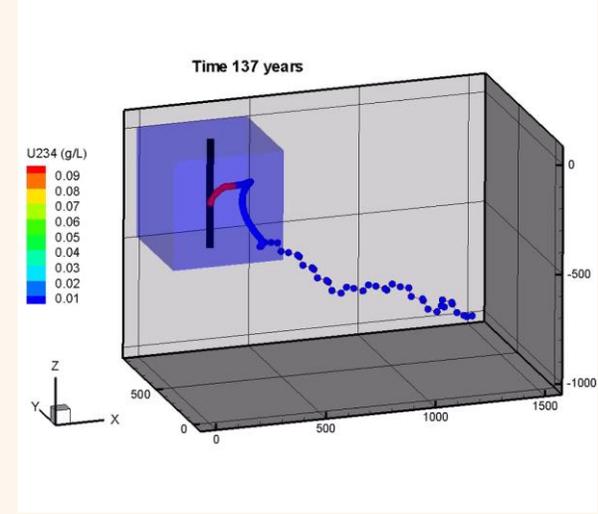
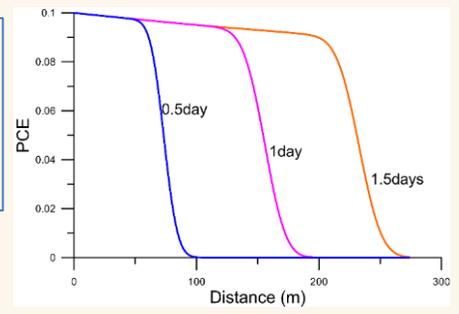
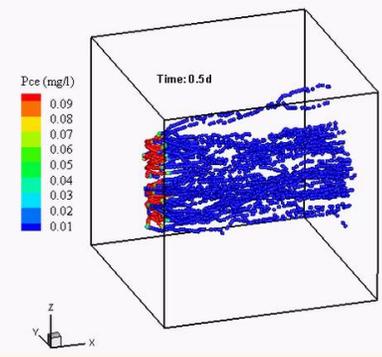


Particle tracking

Chemical reaction (*PCE degradation*) & solute transport



(Vu et al., 2019)



Selroos et al., 2016

Objectives

- **Develop a DFN & ECPM (Hybrid-domain) model for simulating flow and advective transport in fractured rock systems.**

First phase: Flow and advective transport

- **Evaluate potential releasing pathways for radionuclides to leave the canisters, i.e., Q1 to Q3 paths.**

Test case

Numerical model – the concept

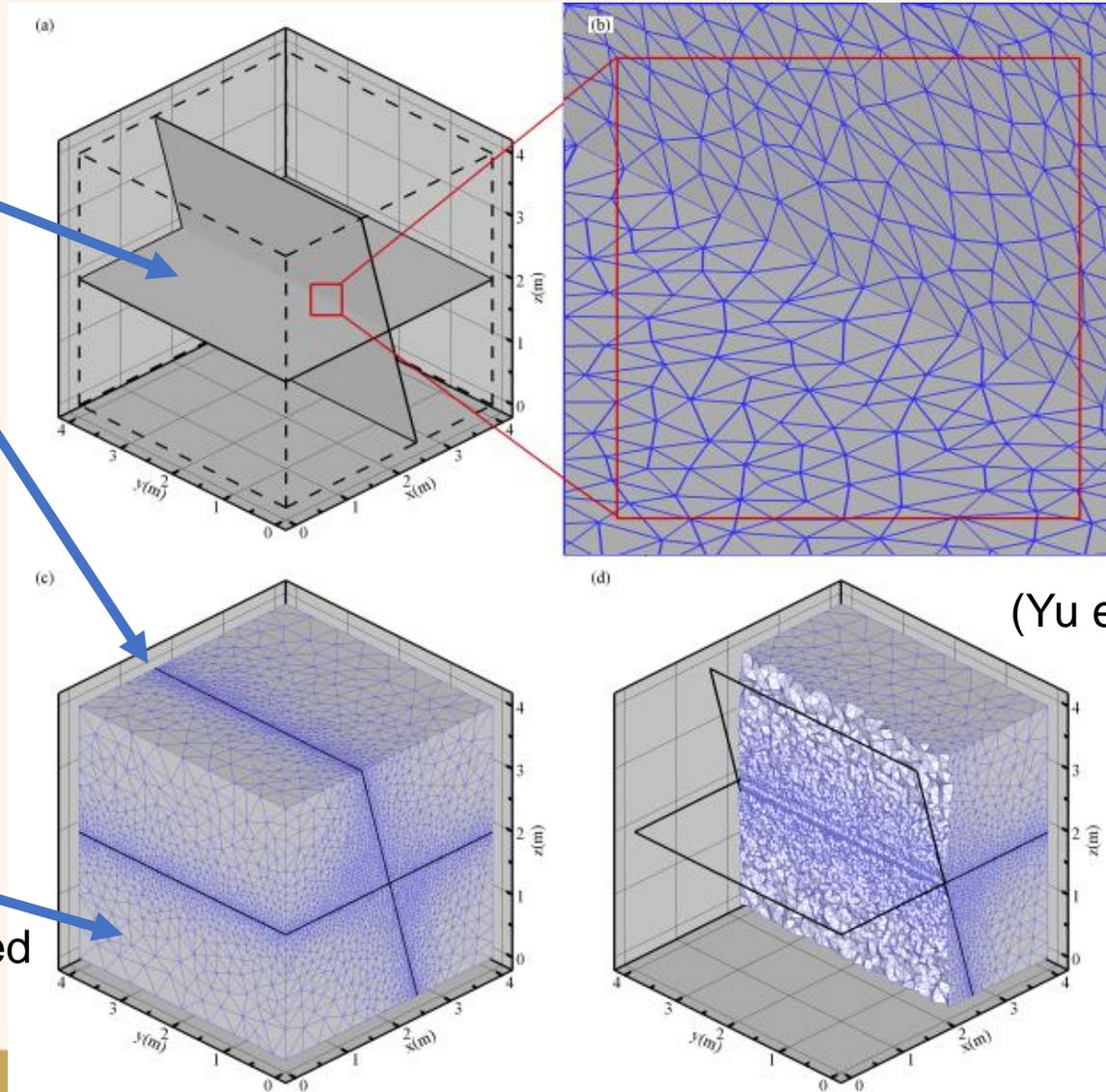
Two fractures with one collinear line

Fractures: triangular elements with arbitrary fracture apertures

$$\nabla \cdot [K(\mathbf{x})b(\mathbf{x})(\nabla h(\mathbf{x}))] + Q(\mathbf{x}) = 0$$

Matrix: Tetrahedral elements with physical flow (or transport) properties

Fractures and the 2D and 3D meshes for the proposed hybrid model.



(Yu et al., 2021)

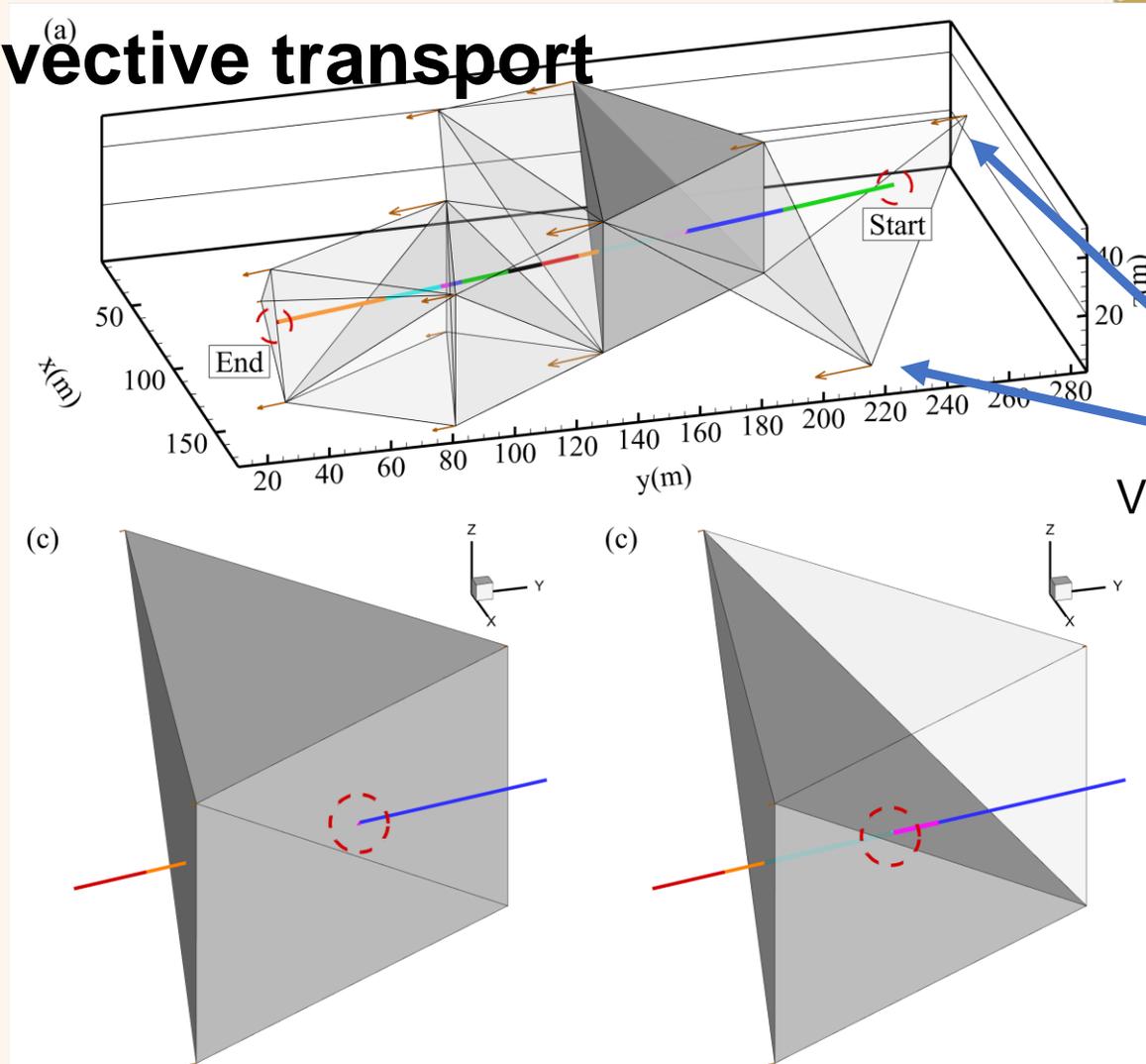
Numerical model – the concept

Particle tracking for advective transport

Ray-Plane test:
determine element faces &
intersection points.

1. Point 3D velocities are calculated based on the velocities at nodes of the element face. (interpolation)
2. Traveling path follows the trajectory of the velocity vectors at the point on the element face.

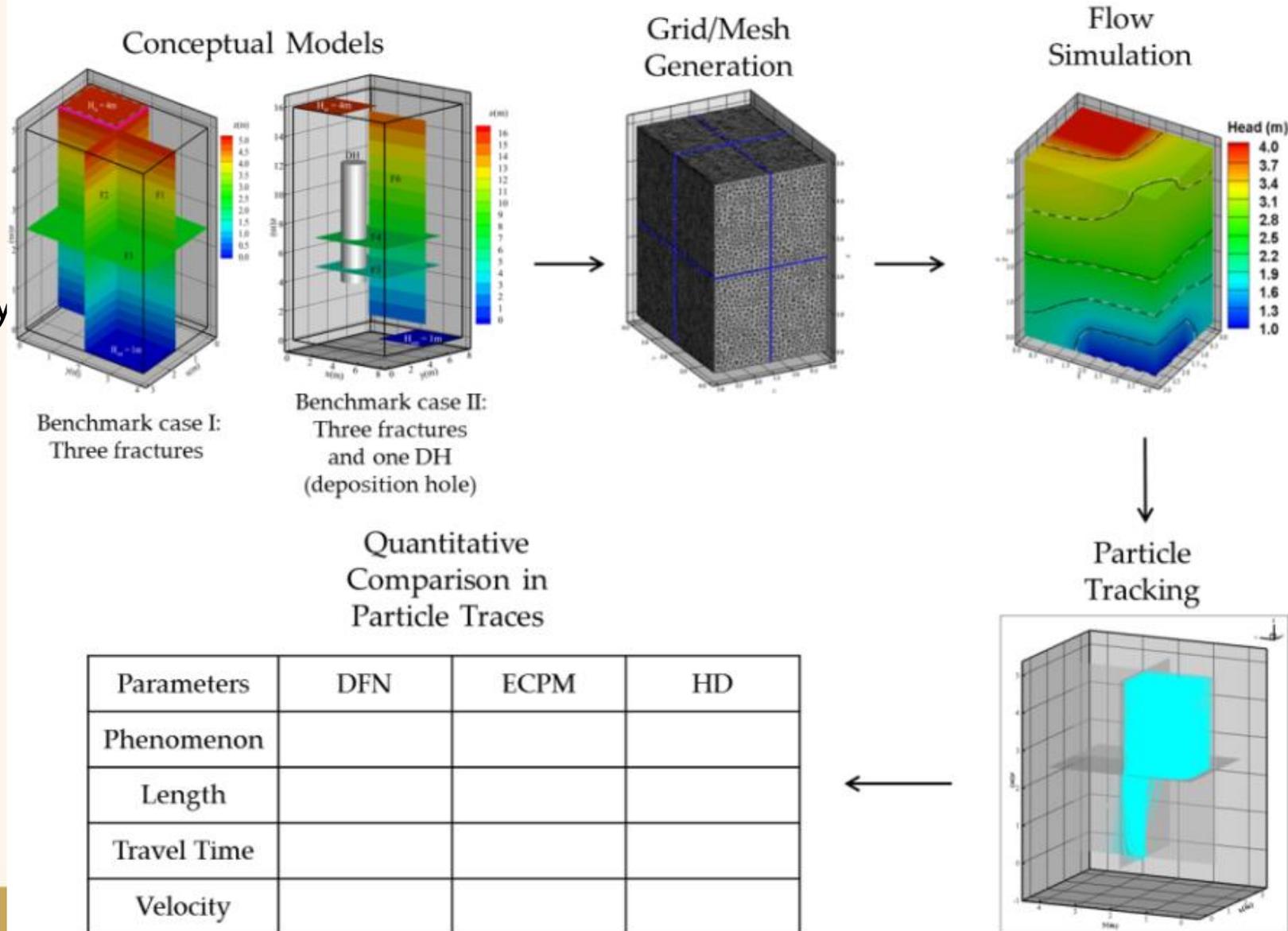
$$\frac{dx}{dt} = u(x,t)$$

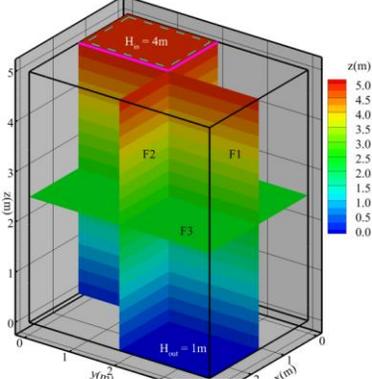


Velocity at nodes

Model tests

- The models
 - DFN → FracMan
 - ECPM → DarcyTools
 - Hybrid-domain HD (this study)
- Workflow
 - Mesh generation
 - Flow simulations
 - Particle tracking
- Two test cases
 - 3 intersected fractures
 - Fractures & deposition hole (DH)

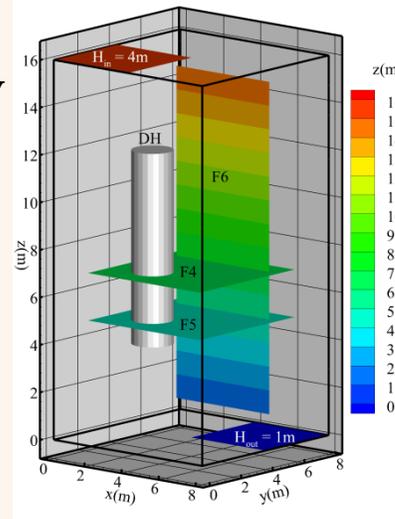




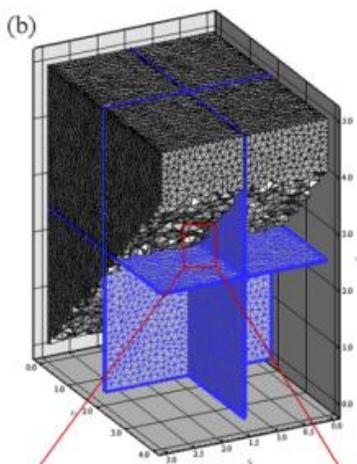
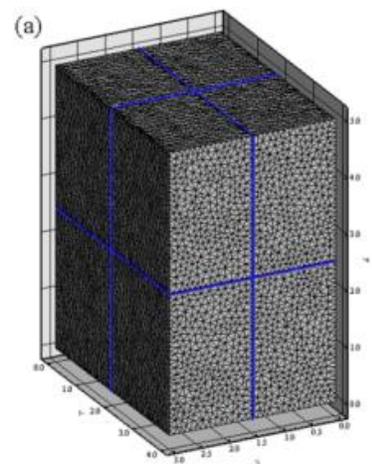
HD: 2D triangular and 3D tetrahedron elements are 9,147 and 290,324, respectively

ECPM model: 131,072 cells with 32, 64, and 64 in x-, y-, and z-directions

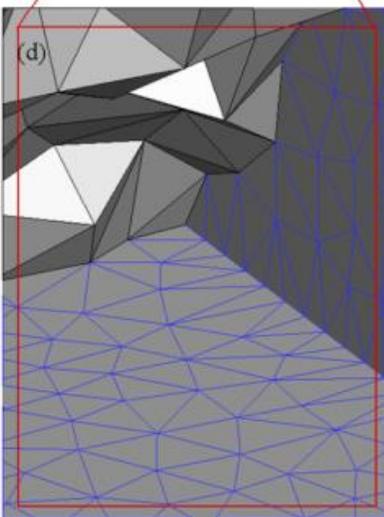
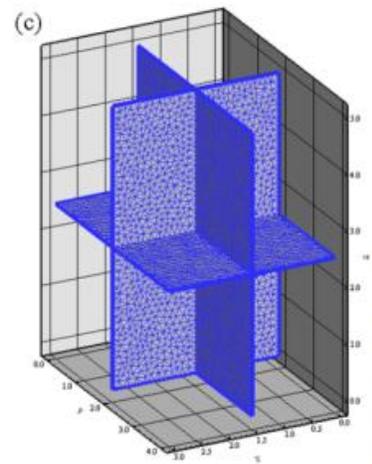
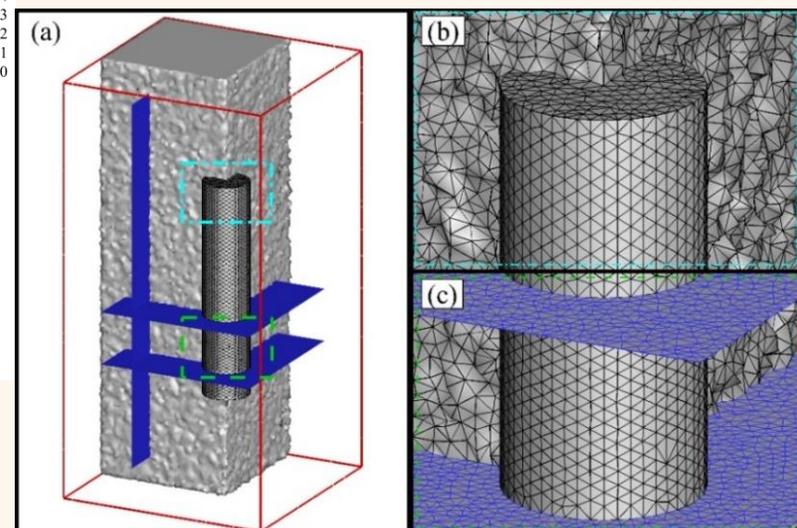
DFN: 12,624 elements



Not to scale



Fractures: FAB file from FracMan software

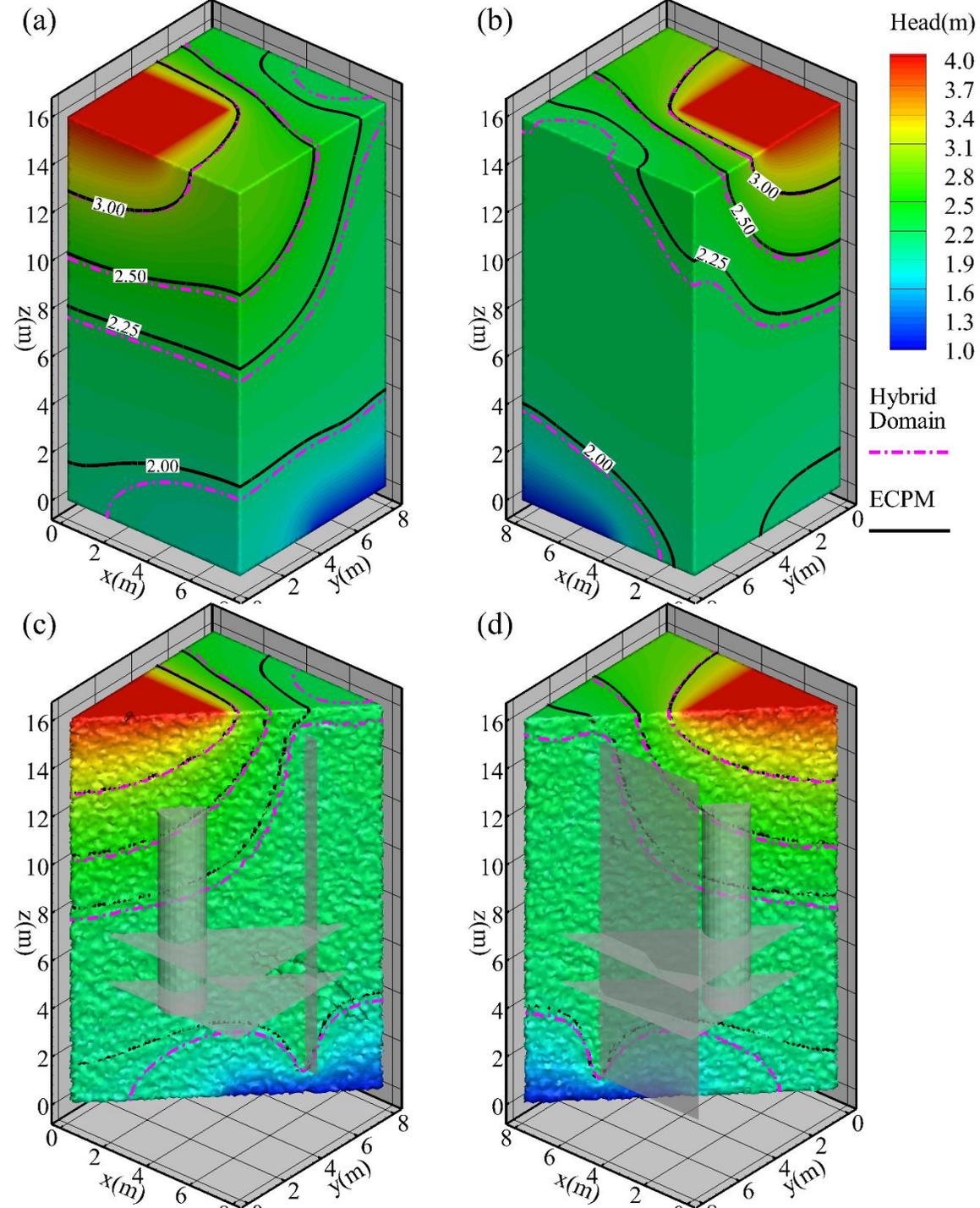
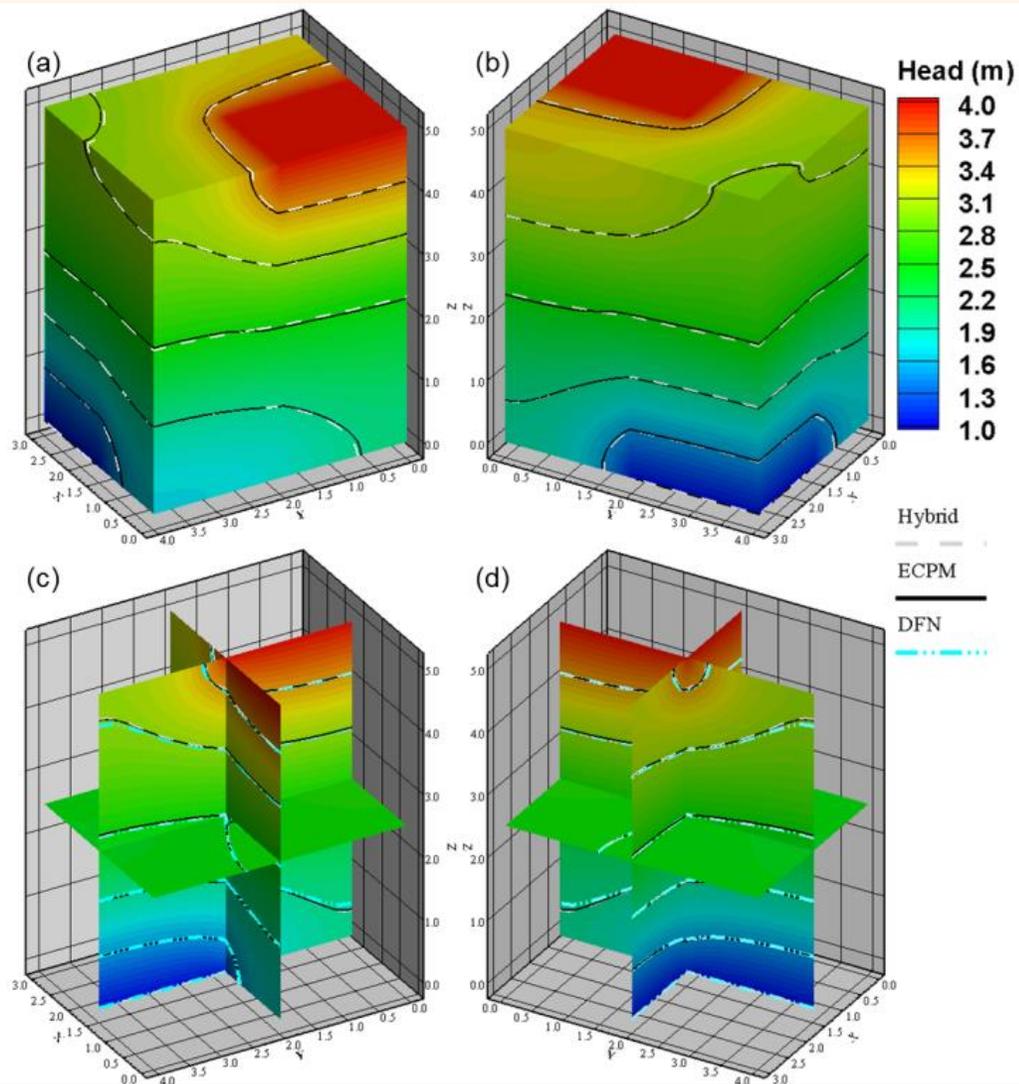


| Parameters | Case I | Case II |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Fracture transmissivity (m ² /s) | 5.0×10^{-10} | 5.0×10^{-7} |
| Matrix hydraulic conductivity (m/s) | 1.0×10^{-10} | 1.0×10^{-10} |
| Deposition hole hydraulic conductivity (m/s) | - | 1.0×10^{-10} |
| Fracture aperture (m) | 1.0×10^{-4} | 1.0×10^{-1} |
| Fracture porosity (-) | 4.0×10^{-1} | 4.0×10^{-1} |
| Rock matrix porosity (-) | 5.4×10^{-3} | 5.4×10^{-3} |
| Convergence criteria (m) | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-8} |
| Particle numbers (-) | 1,000 | 1; 48 ** |

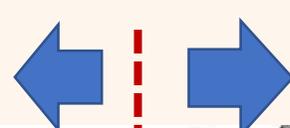
** There is a subcase with 48 particles for Case II.

Not to scale

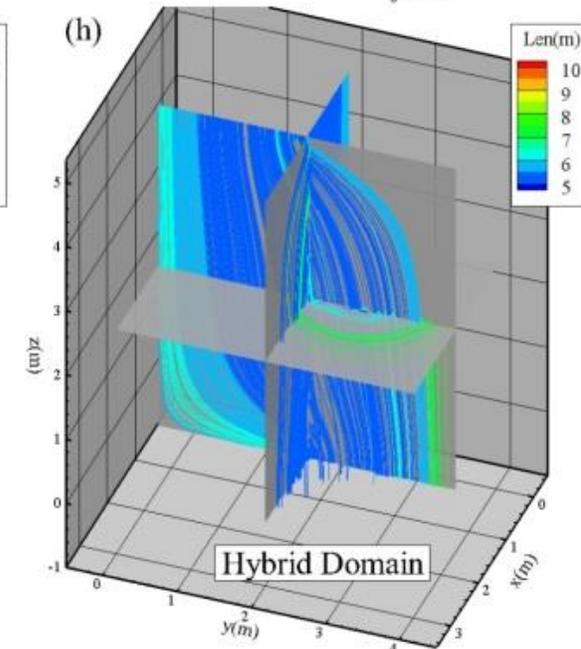
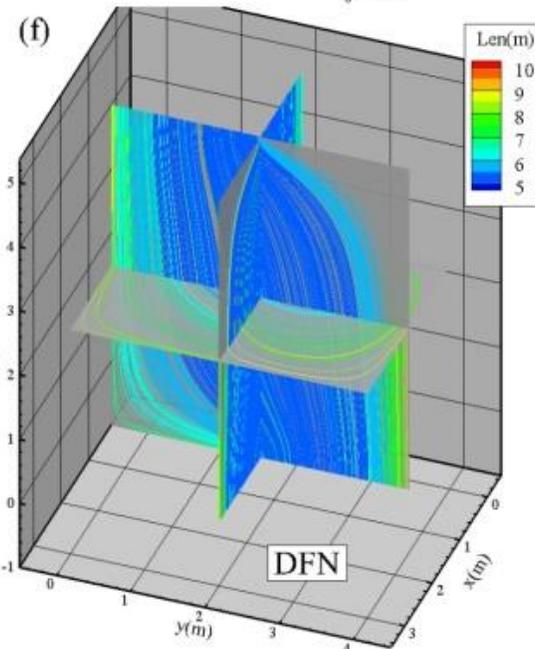
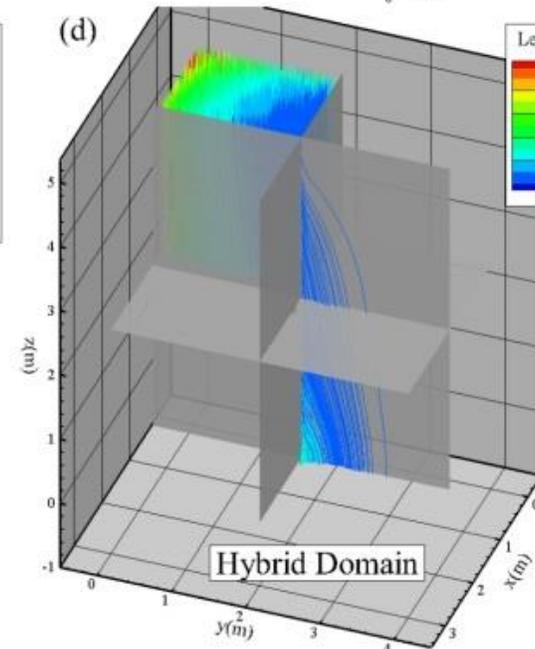
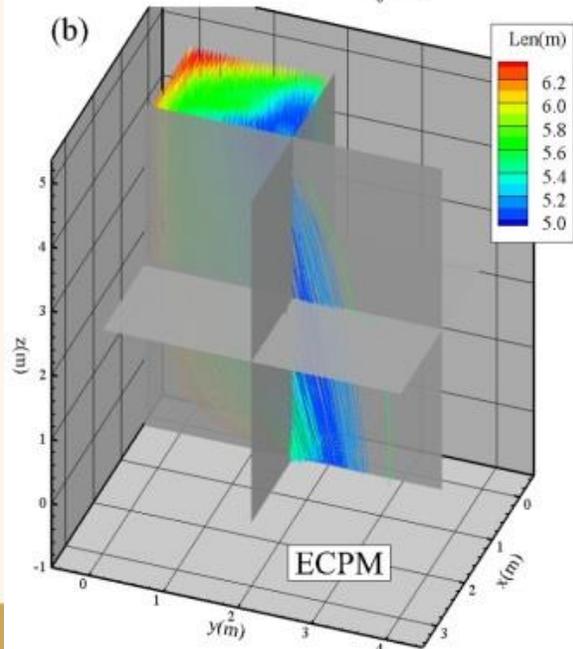
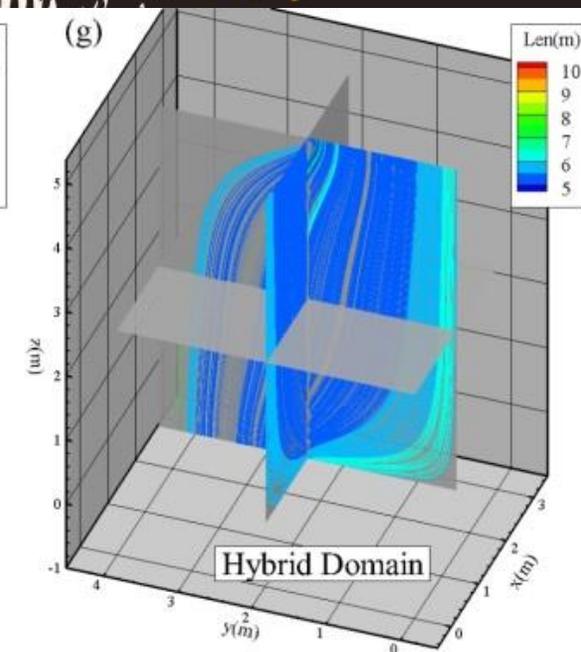
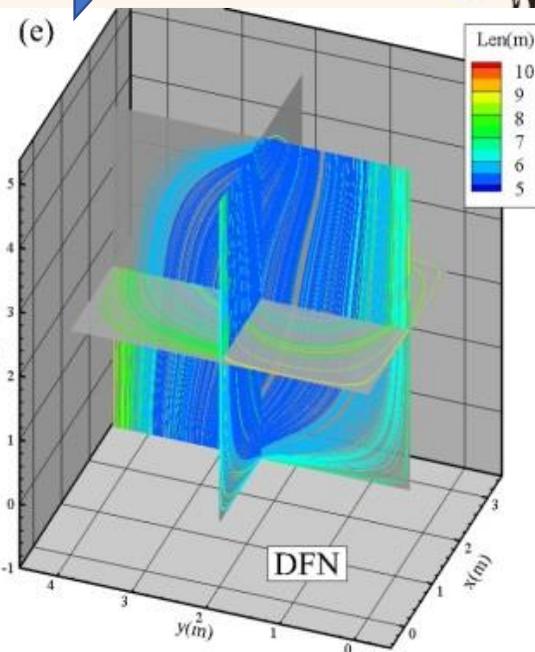
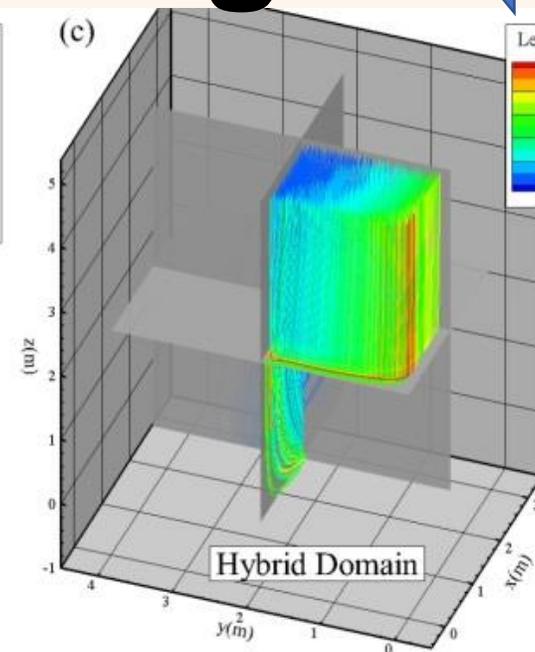
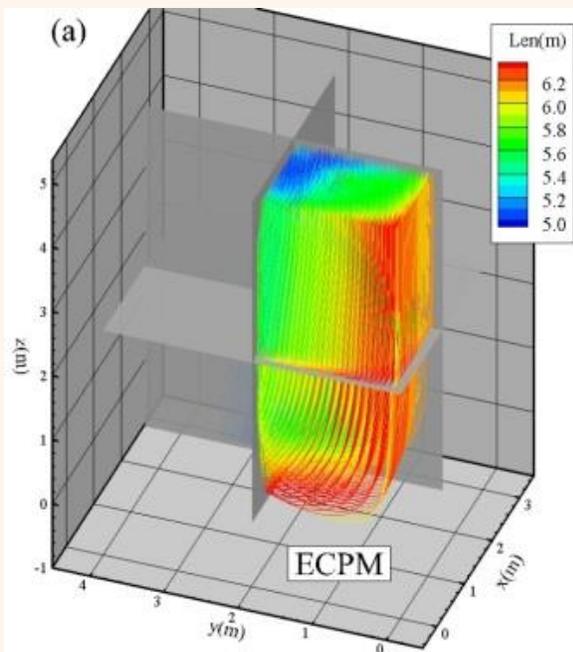
Flow simulations



Particle tracking



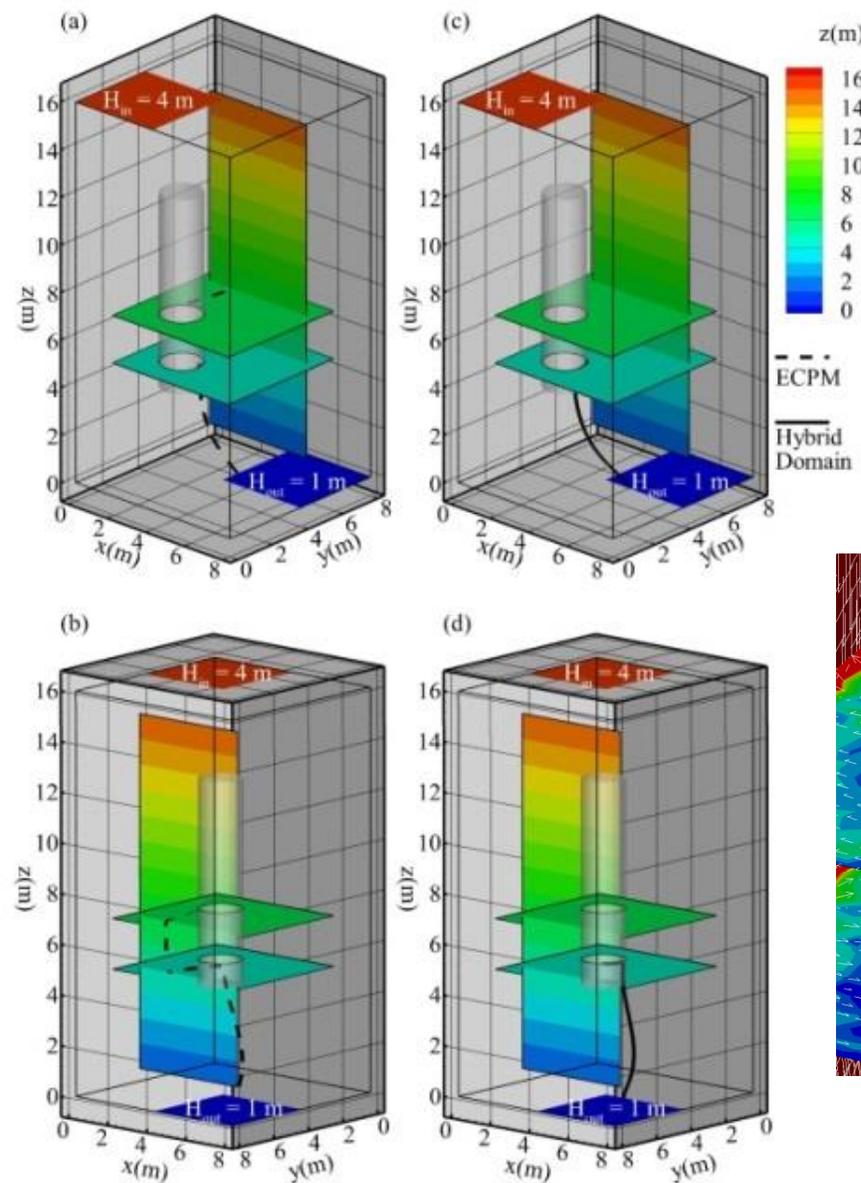
Fracture



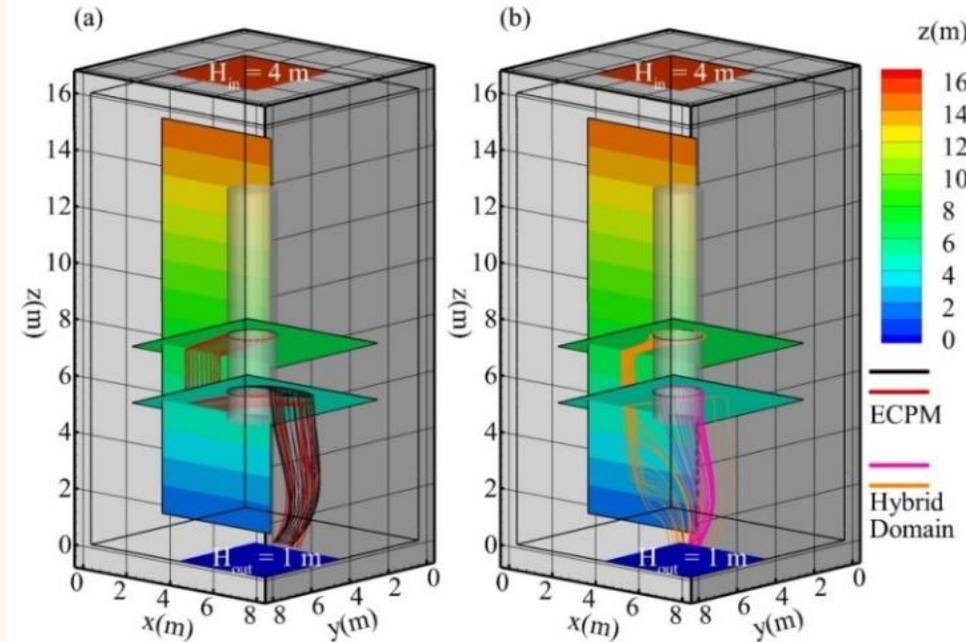
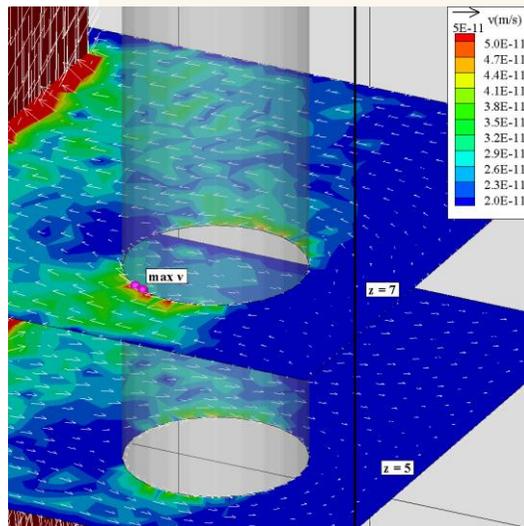
Statistics

| Parameters | | ECPM | HD (fractures and matrix) | DFN | HD (fractures only) |
|--------------|------------|----------------------|------------------------------|----------------------|------------------------|
| Trace length | Mean (m) | 5.61 | 6.38 | 5.51 | 5.38 |
| | STD (m) | 0.35 | 1.01 | 0.63 | 0.37 |
| | CV | 0.062 | 0.158 | 0.114 | 0.069 |
| | Min. (m) | 5.07 | 5.12 | 5.11 | 5.10 |
| | Max. (m) | 6.39 | 10.48 | 9.04 | 7.77 |
| Travel time | Mean (s) | 4.0×10^8 | 2.1×10^8 | 3.2×10^6 | 3.9×10^6 |
| | STD (s) | 2.3×10^8 | 6.4×10^7 | 4.7×10^6 | 2.6×10^6 |
| | CV | 0.58 | 0.30 | 1.47 | 0.67 |
| | Min. (s) | 6.4×10^7 | 1.4×10^5 | 1.8×10^6 | 1.8×10^6 |
| | Max. (s) | 1.2×10^9 | 6.3×10^8 | 5.6×10^7 | 3.1×10^7 |
| Velocity | Mean (m/s) | 2.0×10^{-8} | 1.5×10^{-7} | 2.4×10^{-6} | 6.5×10^{-6} |
| | STD (m/s) | 1.4×10^{-8} | 1.3×10^{-7} | 6.2×10^{-7} | 6.3×10^{-7} |
| | CV | 0.70 | 0.87 | 0.26 | 0.10 |
| | Min. (m/s) | 5.1×10^{-9} | 8.8×10^{-9} | 2.0×10^{-7} | 2.0×10^{-7} |
| | Max. (m/s) | 8.0×10^{-7} | 3.6×10^{-5} | 2.8×10^{-6} | 2.9×10^{-6} |

ECPM & HD



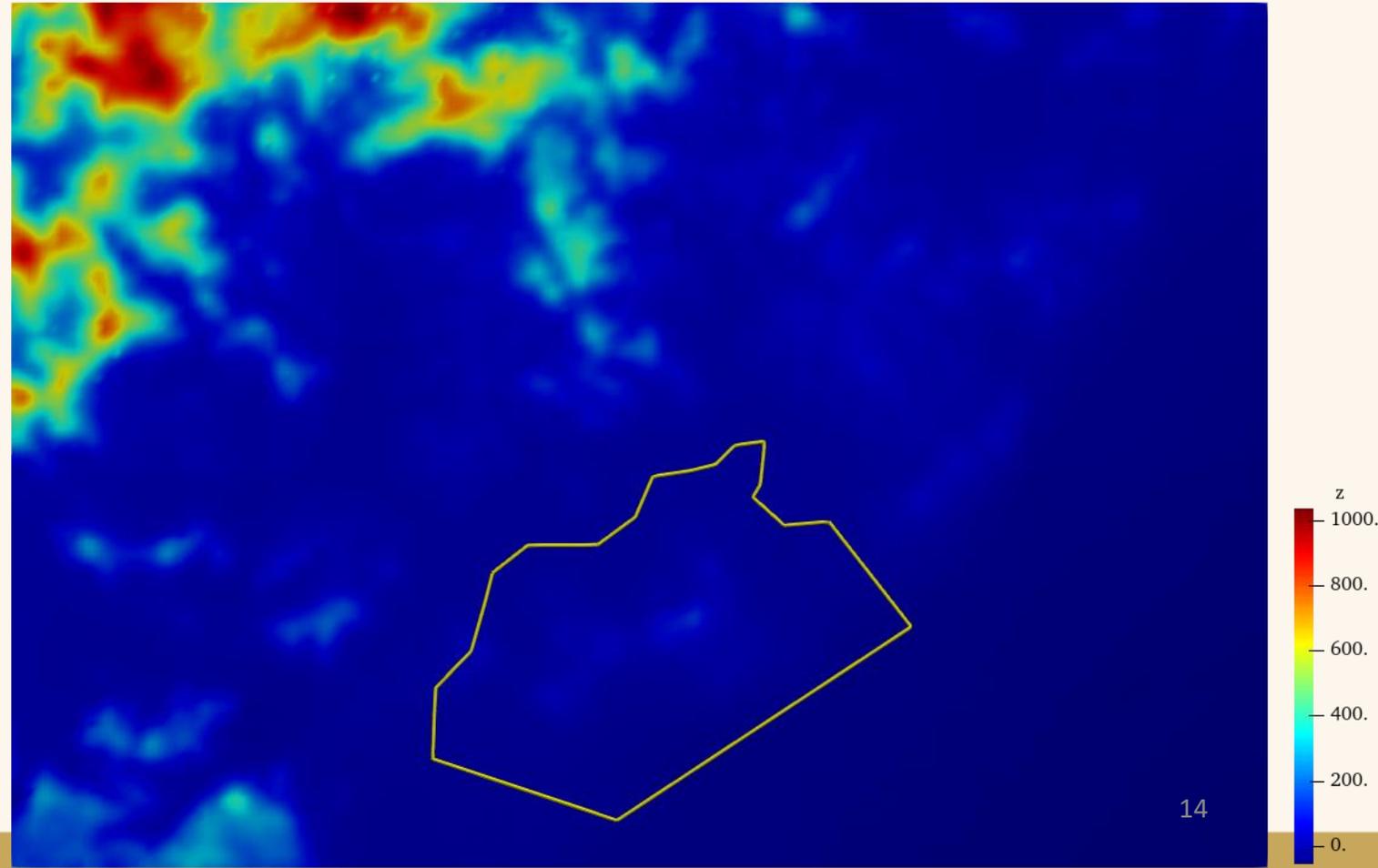
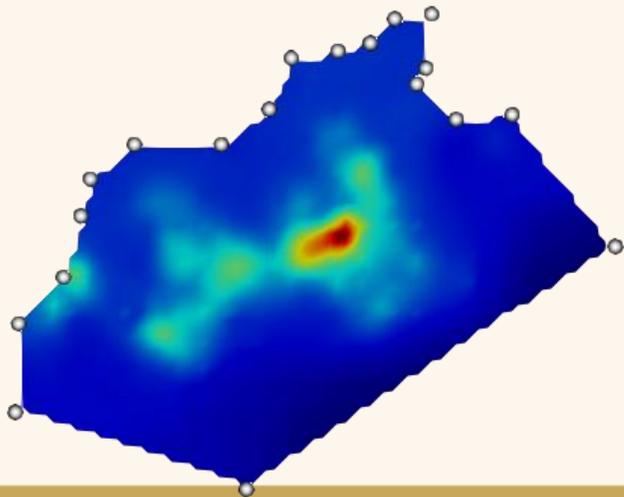
A particle released at the highest velocity location



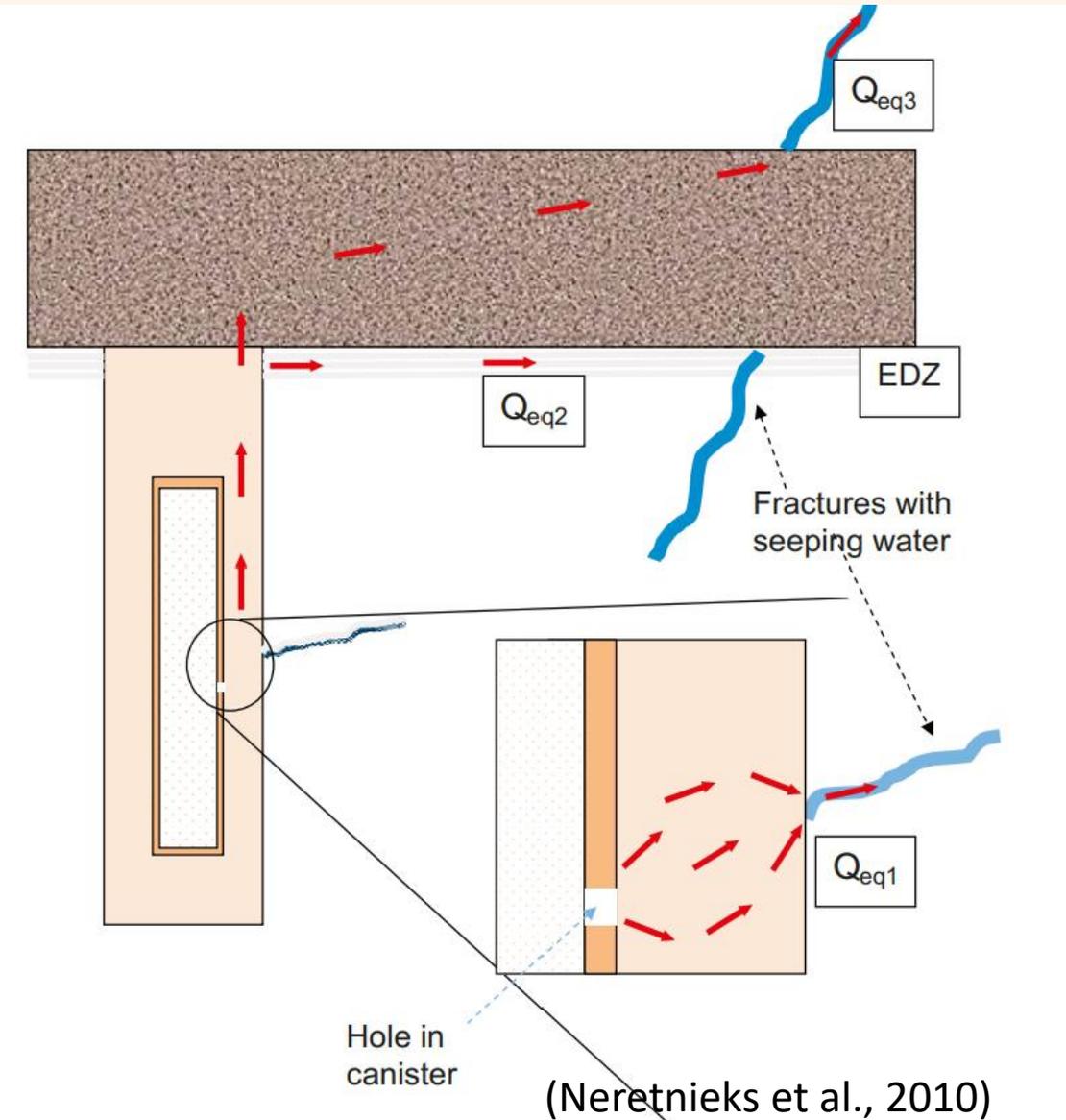
| Parameters | ECPM model | HD model | |
|--------------|------------|------------------------|-----------------------|
| Trace length | Mean (m) | 10.69 | 9.07 |
| | STD (m) | 3.16 | 2.74 |
| | CV | 0.296 | 0.302 |
| | Min. (m) | 7.25 | 5.85 |
| | Max. (m) | 15.70 | 15.10 |
| Travel time | Mean (s) | 9.70×10^9 | 4.25×10^9 |
| | STD (s) | 2.40×10^9 | 1.05×10^9 |
| | CV | 0.247 | 0.247 |
| | Min. (s) | 6.50×10^9 | 2.69×10^9 |
| | Max. (s) | 1.55×10^{10} | 7.10×10^9 |
| Velocity | Mean (m/s) | 1.09×10^{-9} | 2.18×10^{-9} |
| | STD (m/s) | 1.56×10^{-10} | 1.10×10^{-9} |
| | CV | 0.143 | 0.505 |
| | Min. (s) | 8.31×10^{-10} | 1.15×10^{-9} |
| | Max. (s) | 1.37×10^{-9} | 4.33×10^{-9} |

Implementation:

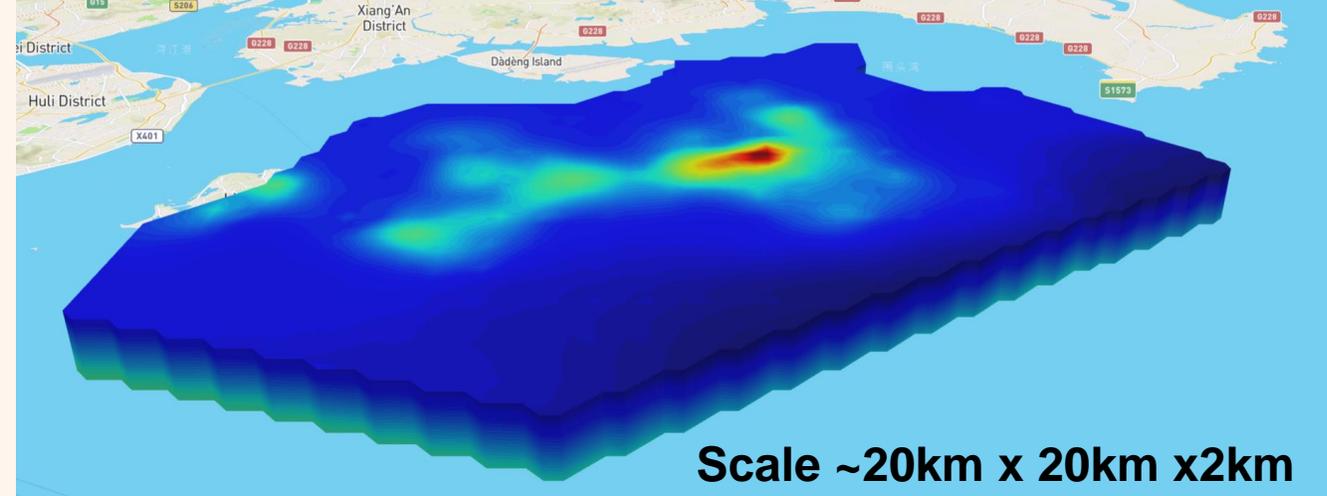
A case with practical scale and complexity



Objectives



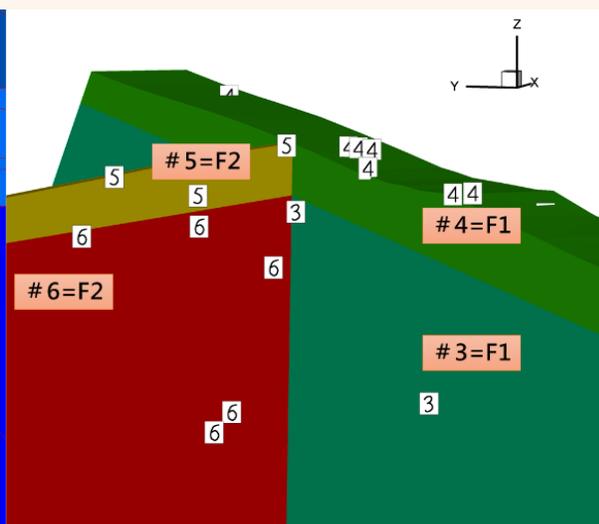
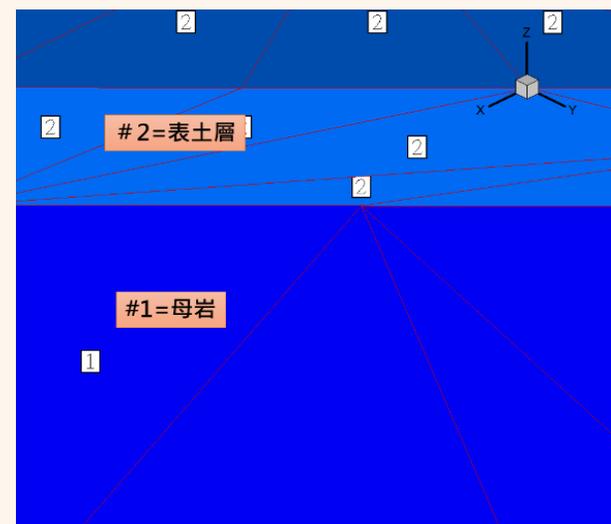
- Implementation of HD model for practical scale & complexity
- Conduct flow and advective transport in fractured formation (FAB)
- Search three main pathways, Q_1 , Q_2 , & Q_3
- Consider layout, main tunnel(MT), deposition tunnel(DT), deposition holes(DH), and excavation damage zone(EDZ) STL(**STereoLithography**)
- Evaluate transport properties



Scale ~20km x 20km x 2km

Section07: DFN Recipe for R# (F# and D# are assumed to be deterministic structures and treated as porous media)

| | FDMA | FDMB- |
|---|---|---|
| Fracture Domain- | Elevation (depth below surface, m) < 70 m- | Elevation (depth below surface, m) > 70 m- |
| Fracture clusters- (Pole_Trend, Pole_Plunge) | Cluster 1 = (198, 18), Fish distribution ($\theta, \kappa = 18$), $P_{32,rel} = 26\%$ - | Cluster 1 = (65, 17), Fish distribution ($\theta, \kappa = 20$), $P_{32,rel} = 15\%$ - |
| | Cluster 2 = (155, 4), Fish distribution ($\theta, \kappa = 15$), $P_{32,rel} = 24\%$ - | Cluster 2 = (344, 38), Fish distribution ($\theta, \kappa = 18$), $P_{32,rel} = 24\%$ - |
| | Cluster 3 = (264, 23), Fish distribution ($\theta, \kappa = 16$), $P_{32,rel} = 18\%$ - | Cluster 3 = (281, 29), Fish distribution ($\theta, \kappa = 16$), $P_{32,rel} = 30\%$ - |
| | Cluster 4 = (98, 81), Fish distribution ($\theta, \kappa = 11$), $P_{32,rel} = 32\%$ - | Cluster 4 = (174, 22), Fish distribution ($\theta, \kappa = 17$), $P_{32,rel} = 10\%$ - |
| | Cluster 5 = (175, 75), Fish distribution ($\theta, \kappa = 19$), $P_{32,rel} = 21\%$ - | |
| | Fisher distribution $f(\theta, \kappa) = \frac{\kappa \sin \theta e^{\kappa \cos \theta}}{\pi^2 (1 + \kappa^2)}$; - θ = the angular displacement from the mean pole vector- κ = a concentration parameter of Fisher distribution- | |
| Fracture intensity- | $P_{32} = 2.4$ - | $P_{32} = 0.3$ - |
| | P_{32} = Area of fractures per unit volume of rock mass (volumetric intensity, m^{-1})- | |
| Fracture size- | Power law : $k_r = 2.6, r_0 = 0.1 m, r_{min} = 4.5 m, r_{max} = 564 m$ - | Power law : $k_r = 2.6, r_0 = 0.1 m, r_{min} = 4.5 m, r_{max} = 564 m$ - |
| | $P(R \geq r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{k_r}, P_{32}(r_{min}, r_{max}) = \left[\frac{r_{min}^{k_r-2} - r_{max}^{k_r-2}}{r_0^{k_r-2}}\right] P_{32}(r_0, \infty)$ - | |
| | R is the fracture radius- r_0 is the minimum radius value- r is any fracture radius between r_0 and ∞ - | |
| | k_r is the exponent of fractal dimension, or the "fracture radius scaling exponent" (La Pointe, 2002, p381)- $P(R \geq r)$ is the probability that a circular-shape fracture with a radius greater than or equal to r - $P_{32}(r_{min}, r_{max})$ is the volumetric fracture intensity corrected with determined fracture radius between r_{min} and r_{max} - | |
| Fracture location- | Stationary random (Poisson) process- | Stationary random (Poisson) process- |
| Fracture Transmissivity ($T, m^2/s$) | $T = a_1 \times (r)^b = a_2 \times (L)^b$ for FracMan/MAFIC; $T = a_3 \times (L_f/100)^b$ for DarcyTools- $\pi r^2 = L^2 = (L_f/100)^2$; $a_2 = a_1 \times (\pi)^{-0.5b}$; $a_3 = a_2 \times (100)^b = a_1 \times (\pi)^{-0.5b} \times (100)^b$ - | |
| | r : radius (m) of a disk fracture; L : equivalent size (m) of a square fracture, m; L_f : physical length (m) of an intersecting fracture in orthogonal direction- | |
| Fracture Aperture (e, m) | $e = 0.5\sqrt{T}$ - | $e = 0.5\sqrt{T}$ - |
| Source- | SNFD-SKBI-PL2015-1023; Vidstrand et al., 2010, p107- | SNFD-SKBI-PL2015-1023; Vidstrand et al., 2010, p106- |

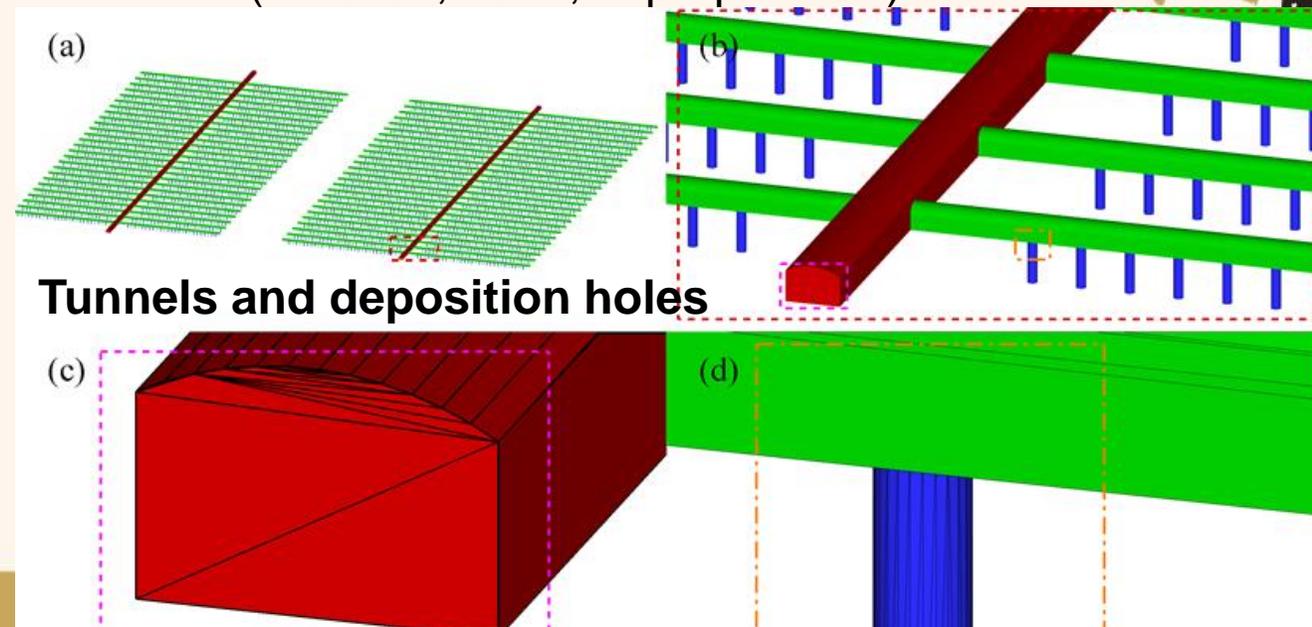


Main rock formations
70m above and below

Faults

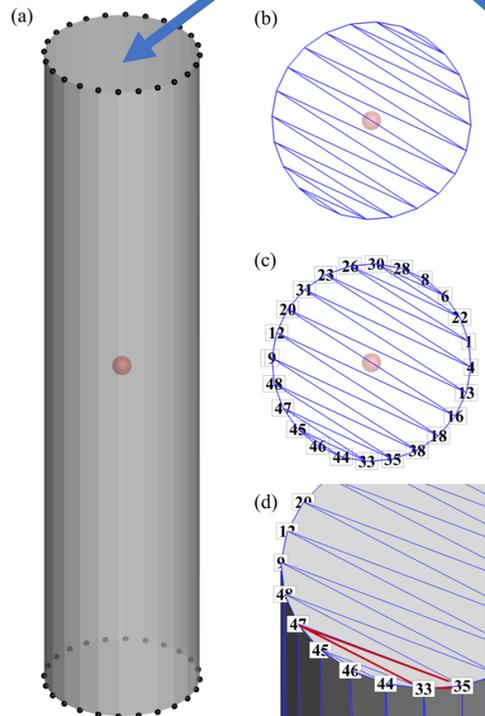
DFN recipe: 70m above and below

(Yu et al., 2022, in preparation)

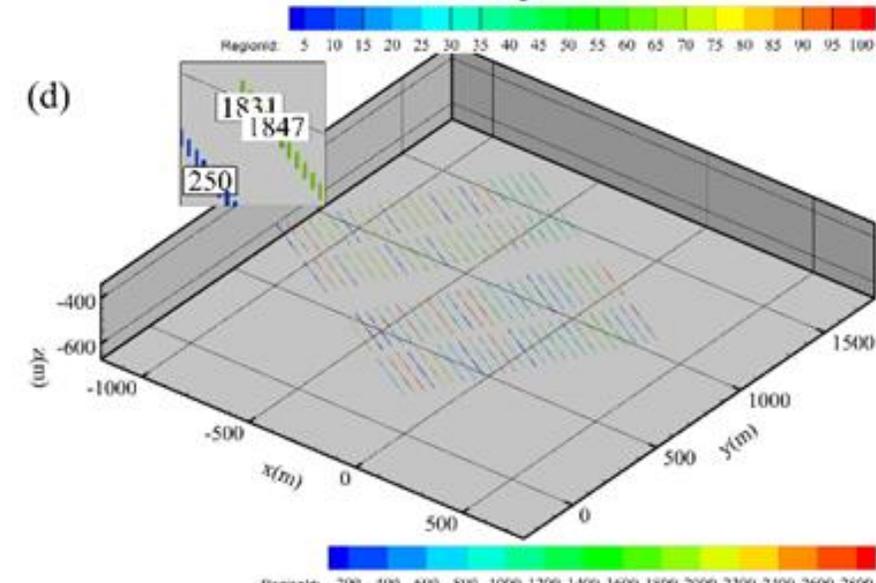
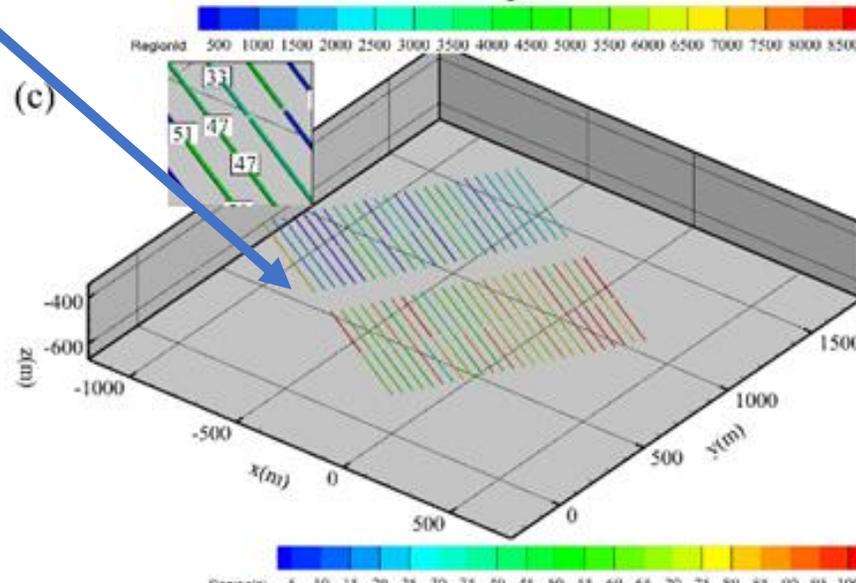
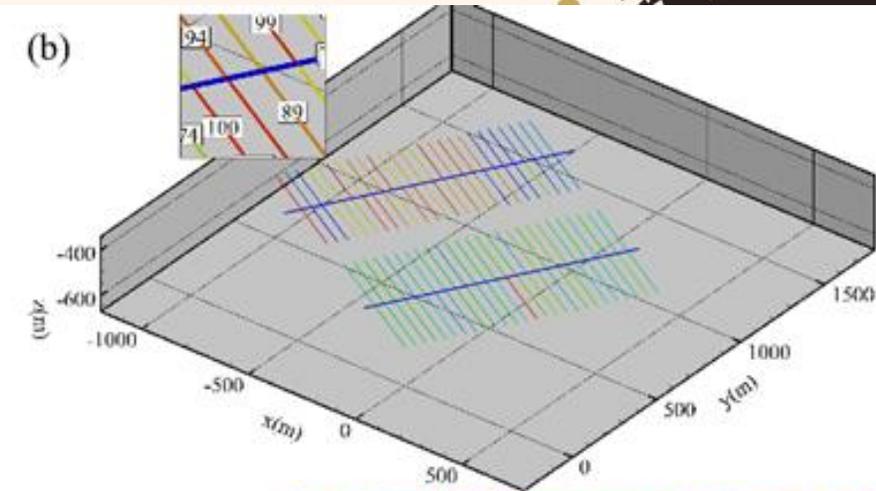
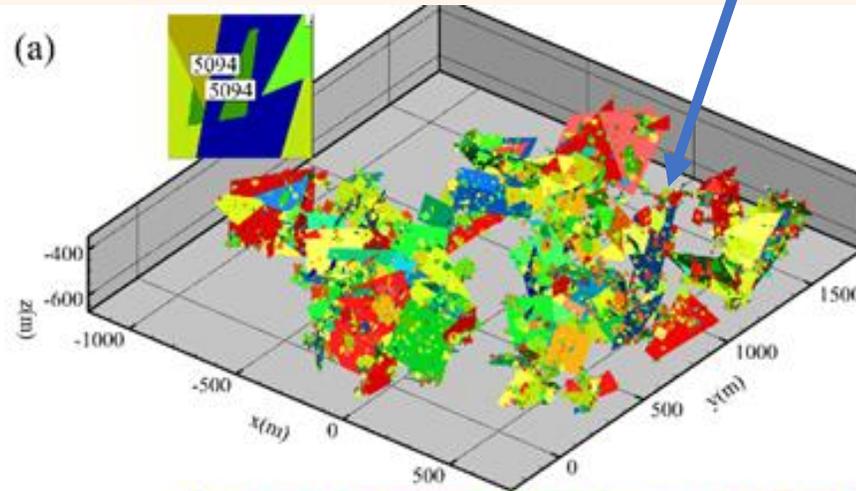


Tunnels and deposition holes

STL files for MT, DT, DH, and EDZ

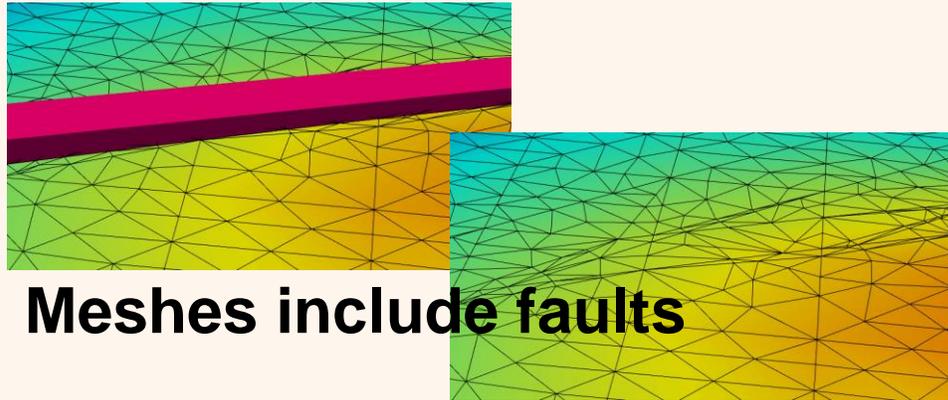


Read DFN FAB file from FracMan

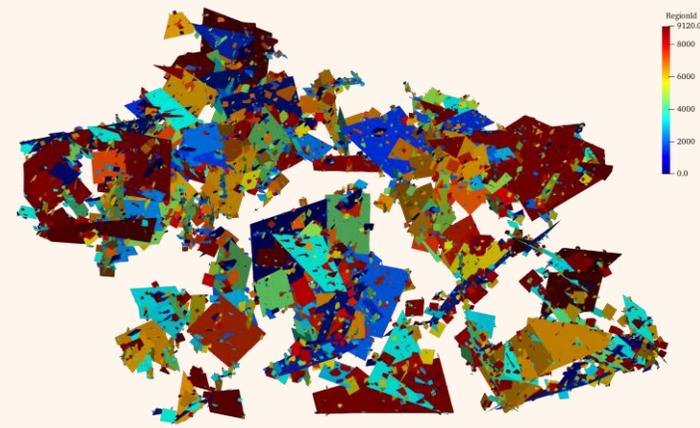
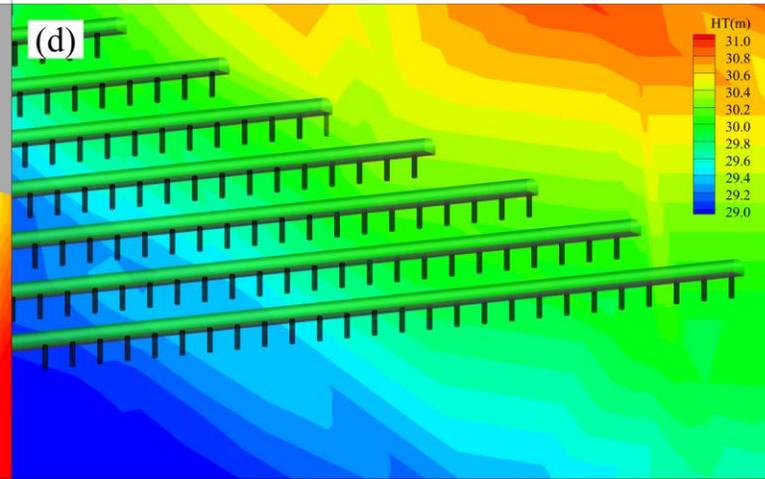
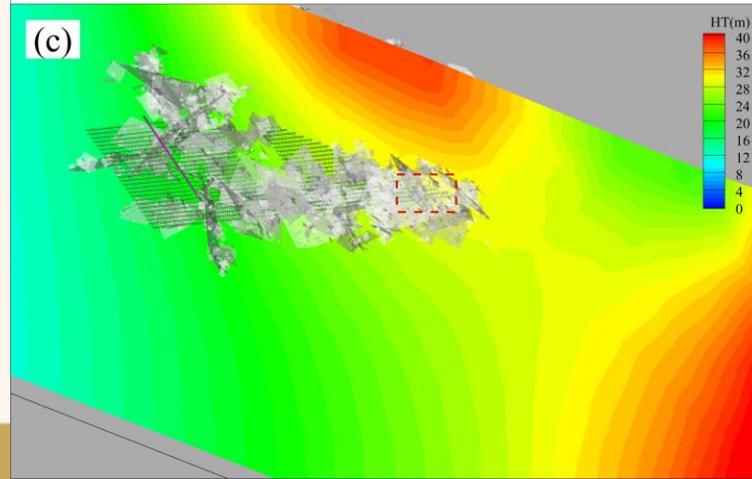
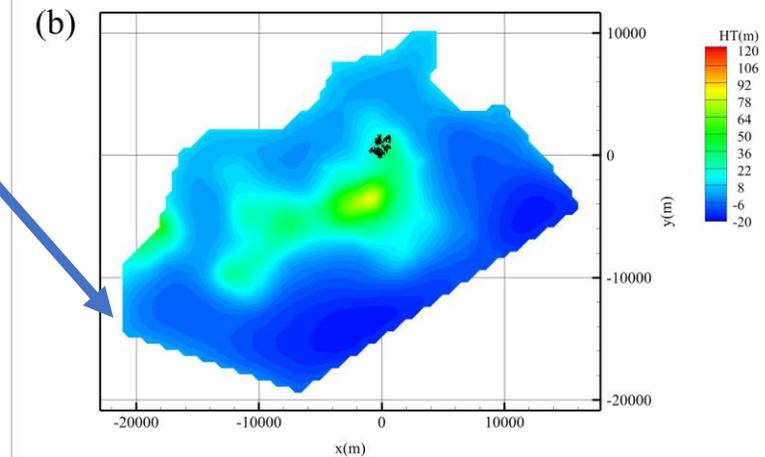
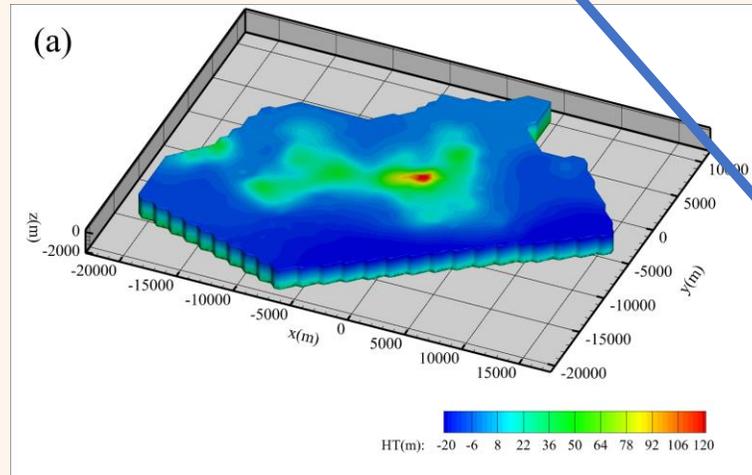


Flow simulation

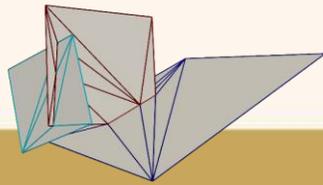
Specified head B.C. for steady state flow



Meshes include faults

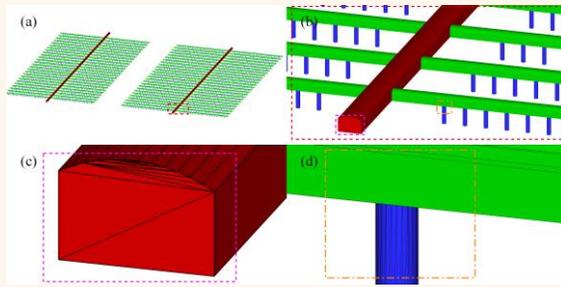


Fractures and the generation of mesh

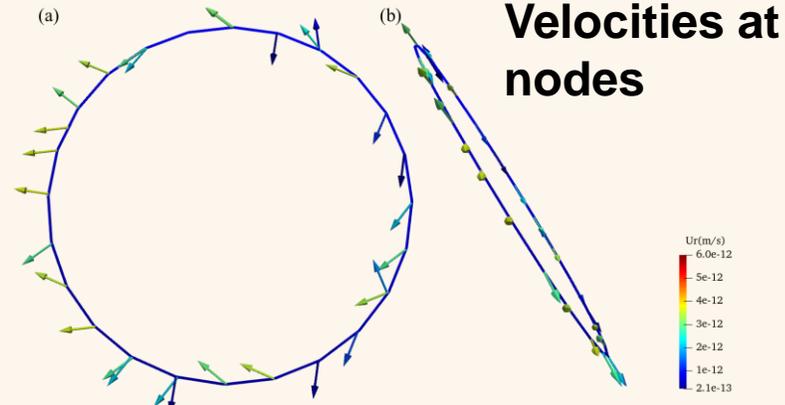
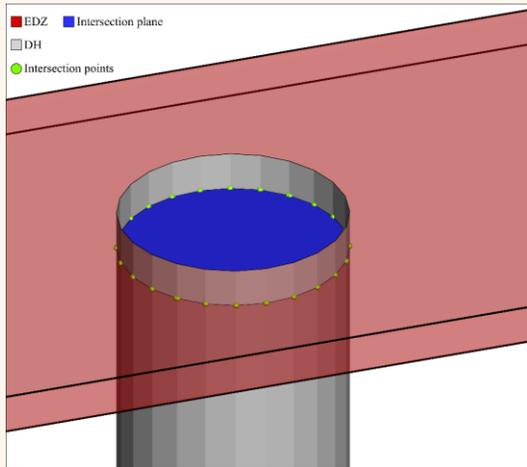
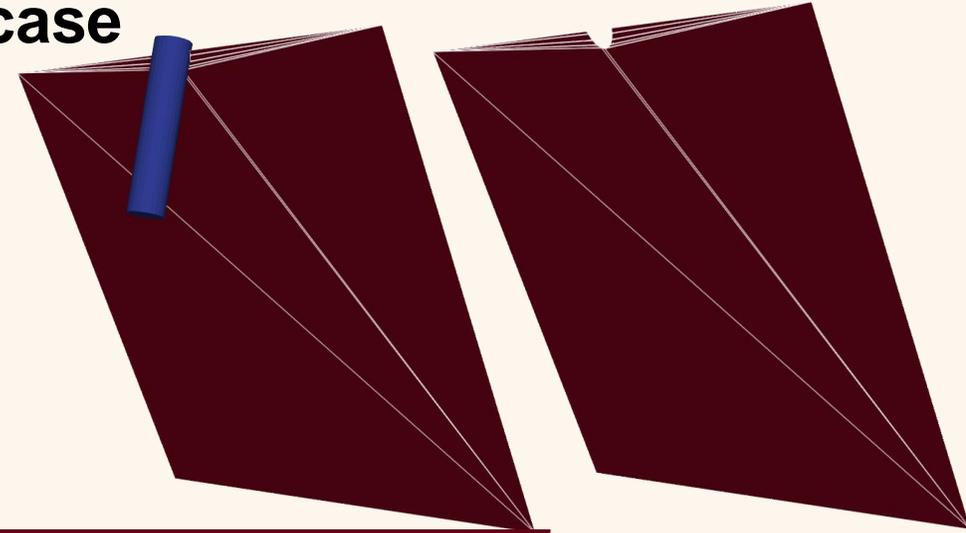


Intersections

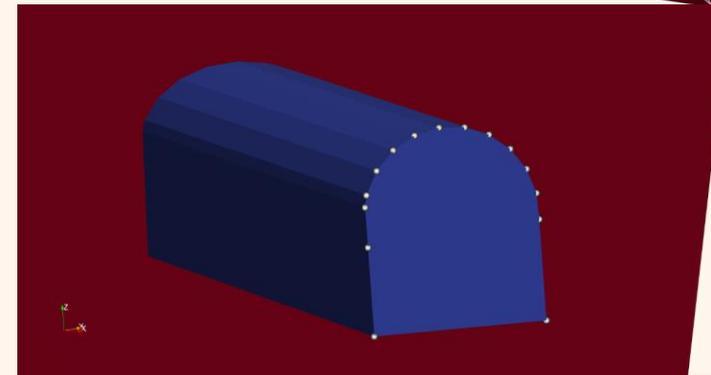
Floating-point Arithmetic(Cherchi et al, 2020)



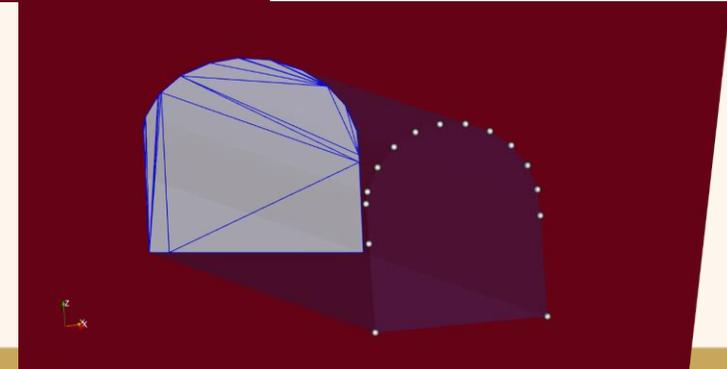
Q1 partially intersected case



Q2 fully intersected case



Q3 fully intersected case



| Path | Type | Intersection | File name |
|------|---------|--------------|------------|
| Q1 | Full | 160 | Q1Full.csv |
| Q1 | Partial | 34 | Q1Part.csv |
| Q2 | Full | 2861 | Q2Full.csv |
| Q2 | Partial | 0 | Q2Part.csv |
| Q3 | Full | 109 | Q3Full.csv |
| Q3 | Partial | 110 | Q3Part.csv |

Particle tracking

| Potential paths | Initial flux (m/s) | Location |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Q1 | 6.746797×10^{-12} | 224.01288, 567.0276, -500.0 |
| Q2 | 6.746917×10^{-12} | 223.14775, 567.361, -500.3 |
| Q3 | 6.746797×10^{-12} | 220.6712, 570.88324, -496.6415 |

Travel time t_r

$$Q1 = 1.30812 \times 10^{16} \text{ (s)}$$

$$Q2 = 1.30888 \times 10^{16} \text{ (s)}$$

$$Q3 = 1.77045 \times 10^{16} \text{ (s)}$$

Darcy velocity U_r

$$Q1 = 6.746797 \times 10^{-12} \text{ (m/s)}$$

$$Q2 = 6.746917 \times 10^{-12} \text{ (m/s)}$$

$$Q3 = 6.746797 \times 10^{-12} \text{ (m/s)}$$

Equivalent flux Q_{eq}

$$Q1 = 2.190107 \times 10^{-16} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q2 = 1.025728 \times 10^{-11} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q3 = 1.770446 \times 10^{-15} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Travel length L_r

$$Q1 = 8323.562 \text{ (m)}$$

$$Q2 = 8316.176 \text{ (m)}$$

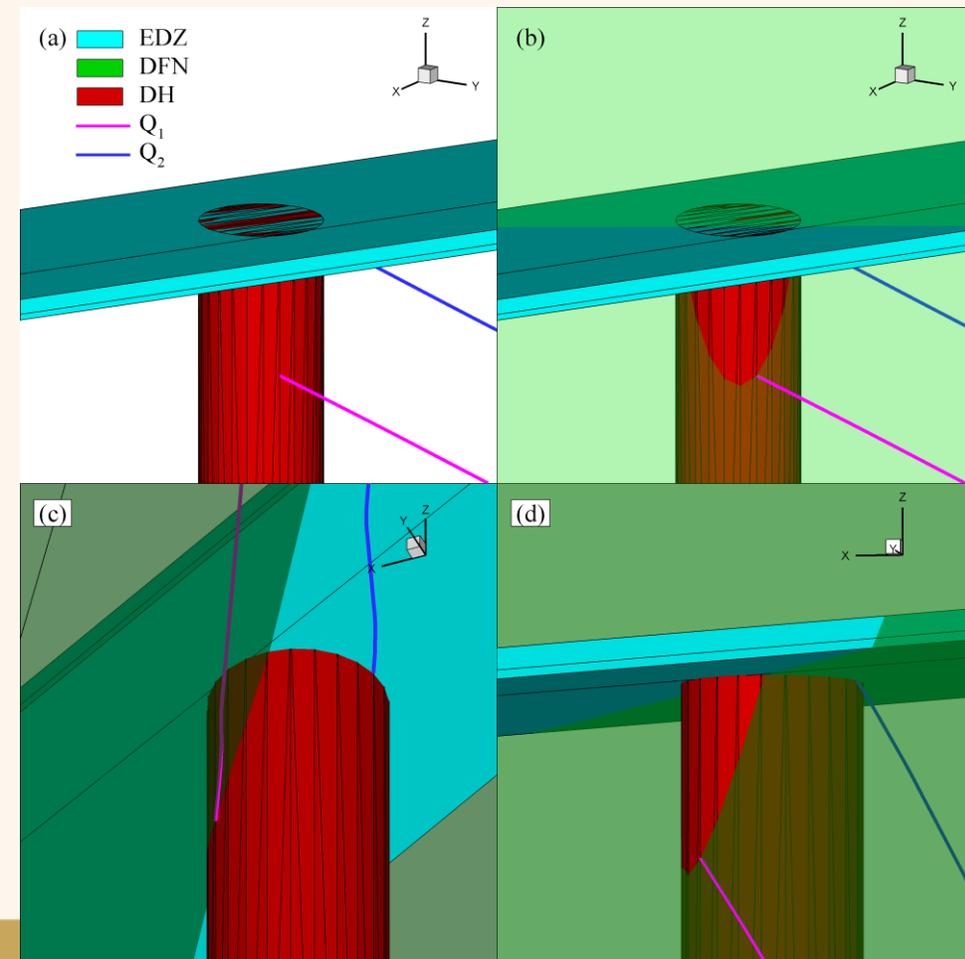
$$Q3 = 7664.157 \text{ (m)}$$

Transport resistance F_r

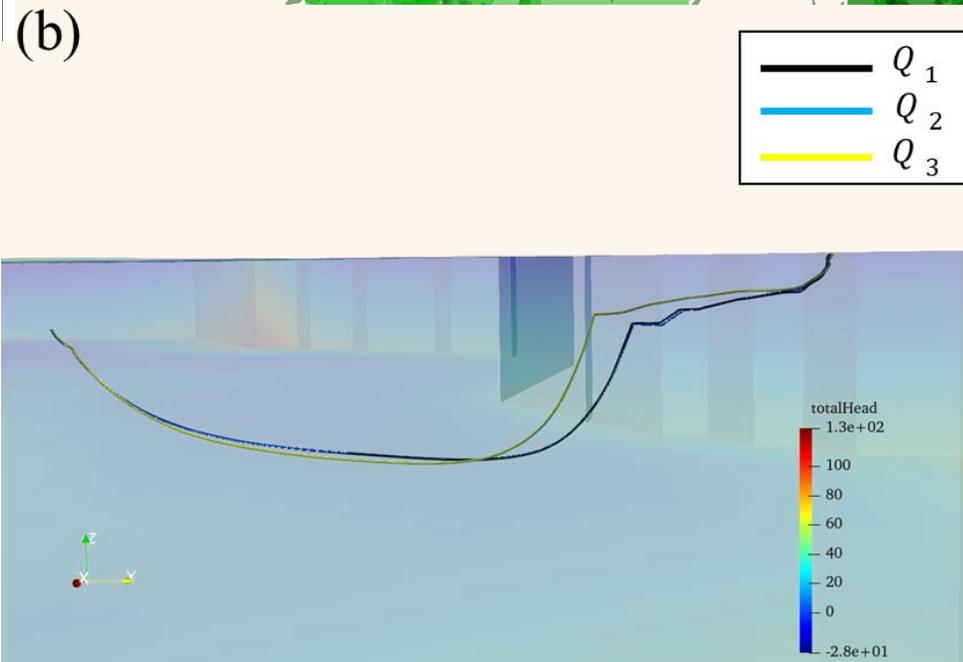
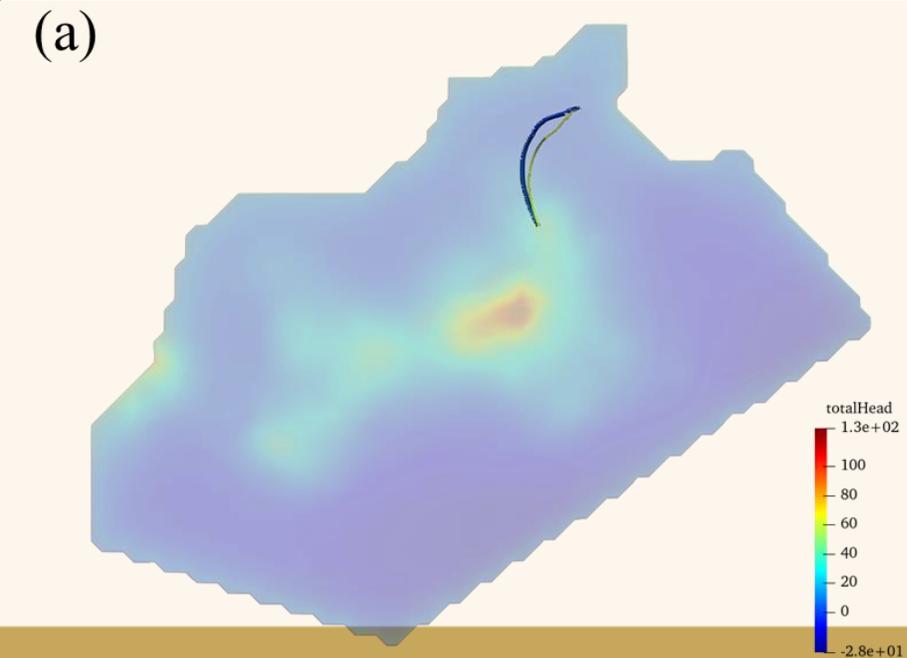
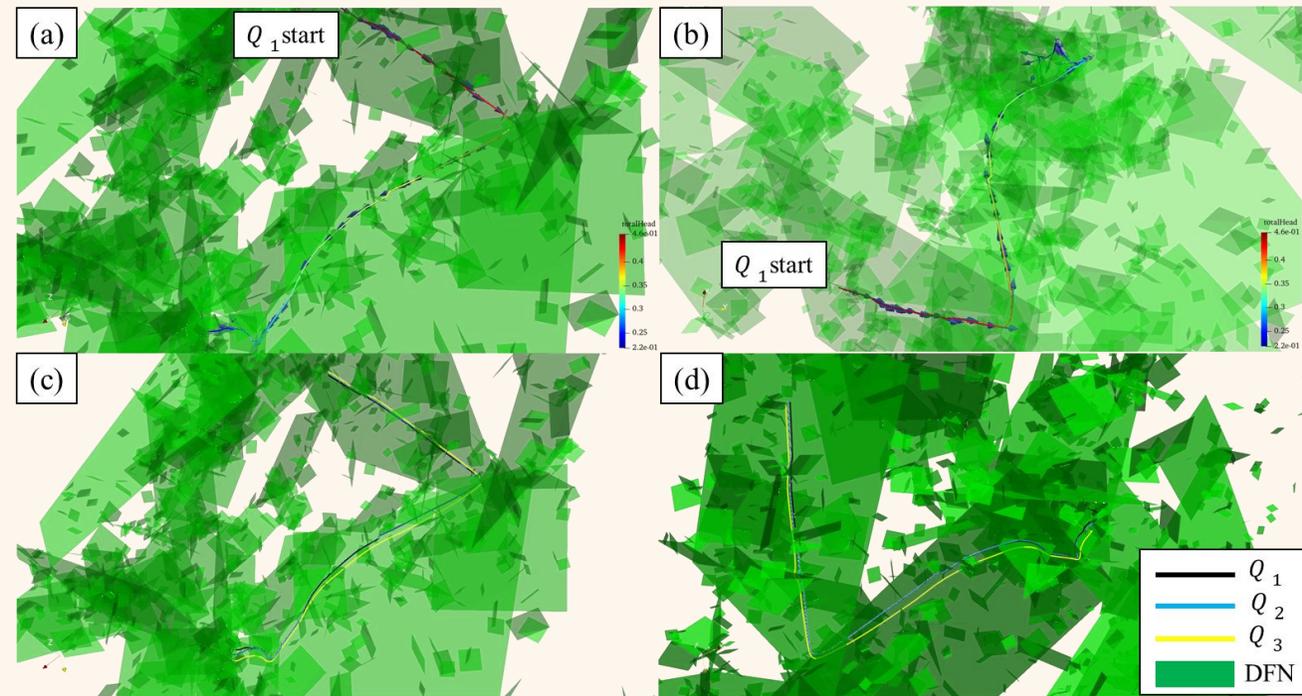
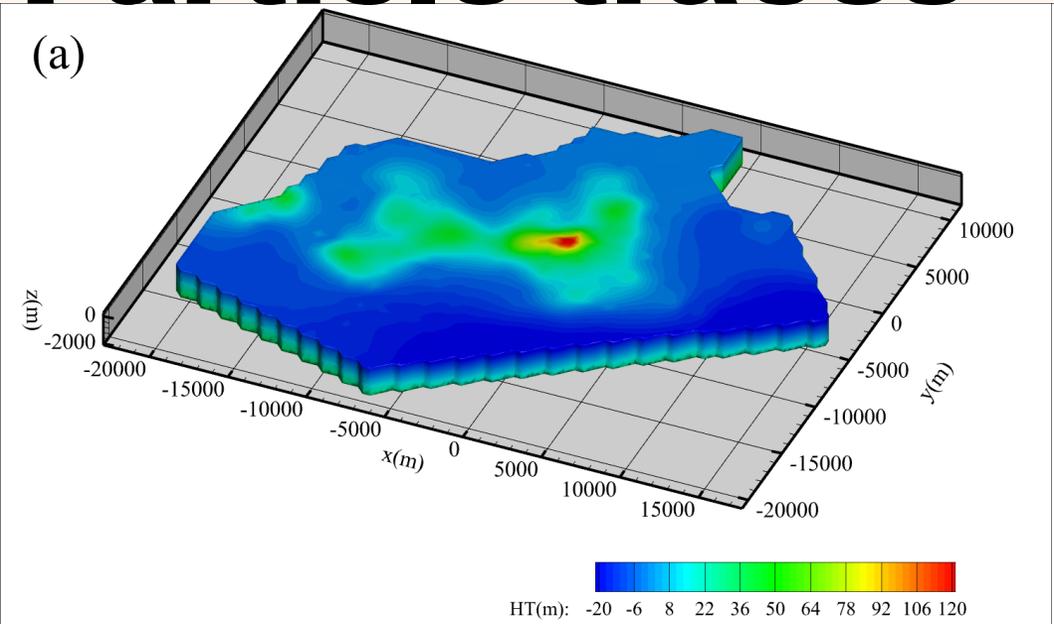
$$Q1 = 6.2745881 \times 10^{16}$$

$$Q2 = 6.2783641 \times 10^{16}$$

$$Q3 = 5.3679468 \times 10^{16}$$



Particle traces



Conclusion

- The study has developed the HD approach for the simulation of advective transport in fractured rocks.
- HD model is flexible in considering the concepts of DFN, ECPM, or both.
- A regional-scale case with objects of a disposal facility was employed to evaluate the developed model.
- Results show that the objects of a disposal facility and predefined DFN could be included in the HD model, and the intersections between disposal facility and fractures has been obtained successfully.



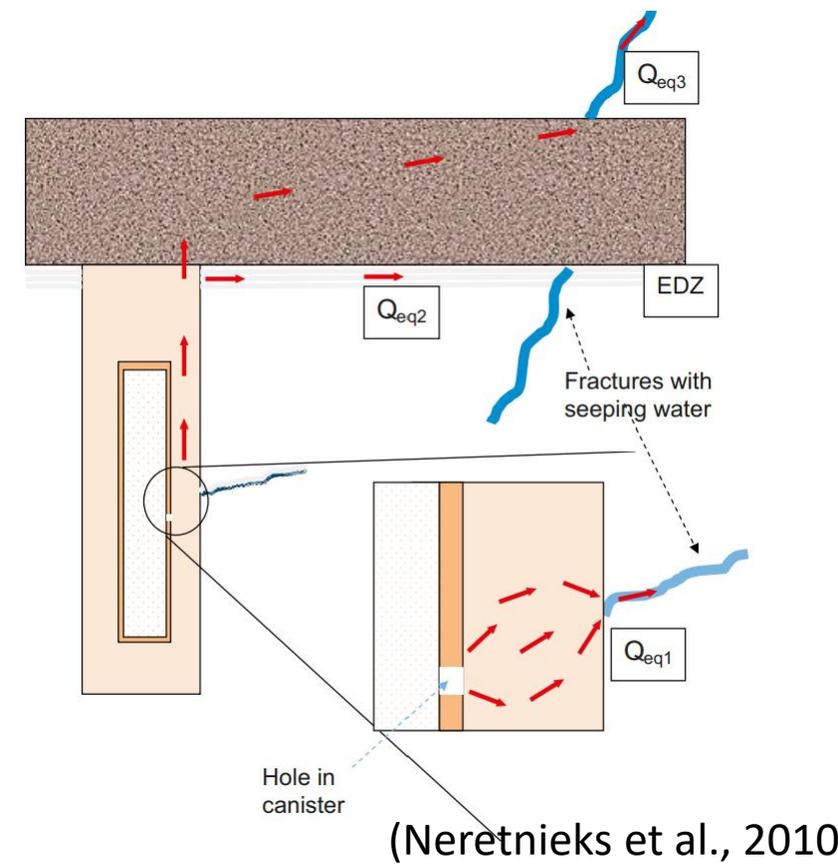
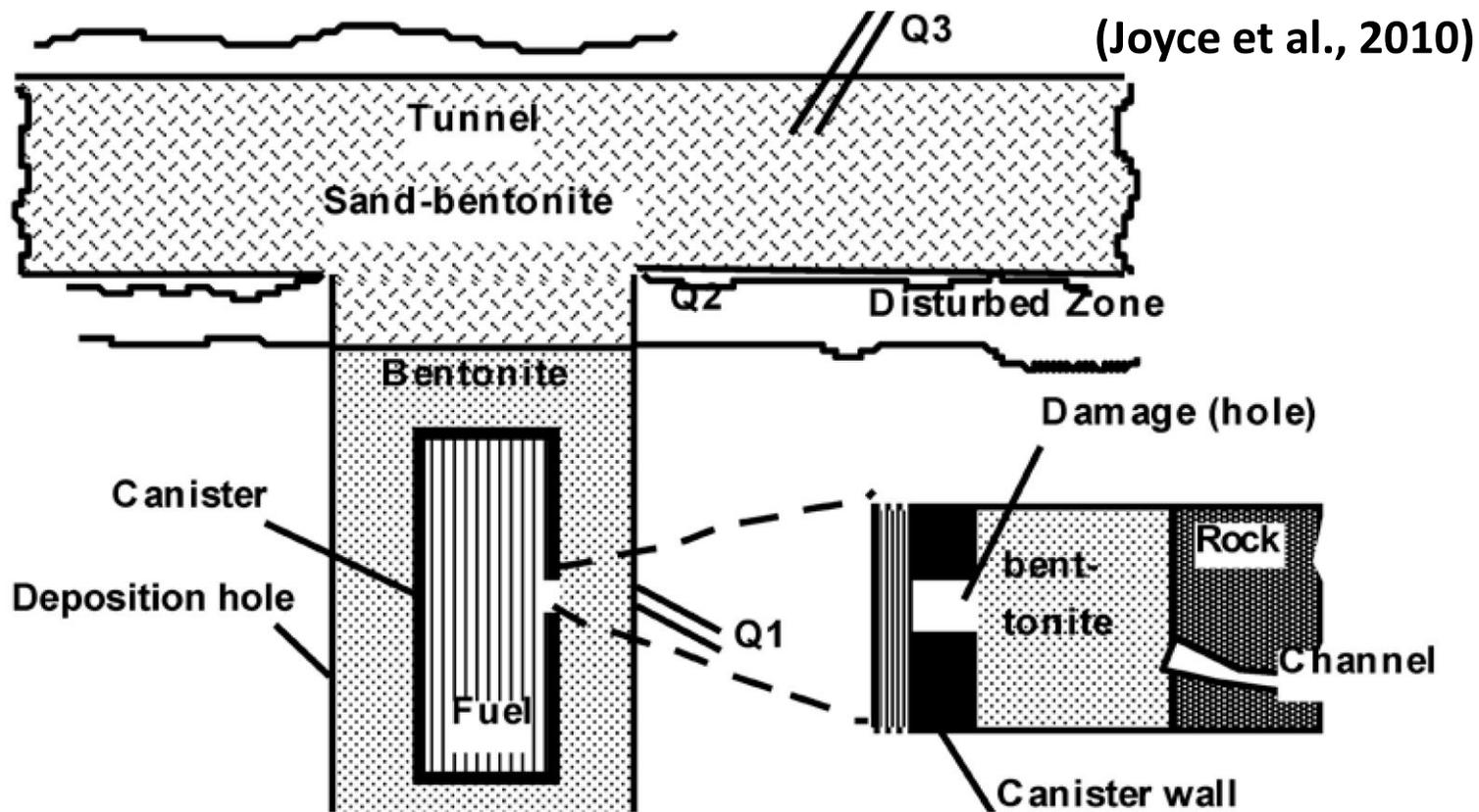
Thank you!

- ◆ Email: nichuenfa@geo.ncu.edu.tw
- ◆ Tel: +886-3-4227151 ext. 65874
- ◆ Fax: +886-3-4263127



國立中央大學 環境研究中心
Center for Environmental Studies





The solute encounters a number of transport resistances (Fr) in series. For example in the canister defect scenario for transport from the fuel to the seeping water a nuclide has to diffuse from the fuel through a hole in the canister to the clay buffer, then from the exit of the hole in the canister out into and through the buffer to reach the seeping water in the fracture in the rock. As the nuclide approaches the fracture in the rock it will have to find the narrow fracture. This can also be expressed as a resistance. All these resistances can be expressed as inverse of the corresponding equivalent flowrates.

volume of rock. This is a measure of the potential for retention and retardation of radionuclides within the rock.

The subscript “r” indicates that the PM is calculated in the rock. That is, they only represent cumulative PMs for those parts of paths within the rock and exclude parts of flow-paths that pass through the EDZ or tunnel backfill. PMs are calculated for legs of paths within the EDZ and tunnels, but are computed as separate PMs for each path and distinguish by an “EDZ” or “t” subscript, respectively.

In a DFN representation the PMs are defined as:

1. Travel-time, $t_r = \sum_f \frac{e_{fj} w_f \delta l}{Q_f}$, where δl is a step length along a path of f steps, each between

a pair of fracture intersections, e_{fj} is the fracture transport aperture, w_f is the flow width between the pair of intersections, and Q_f is the flow rate between the pair of intersections in the fracture.

2. Equivalent flux at the release point, U_r , described in more detail below.

3. Equivalent flow rate at the release point, Q_{eq} , described in more detail below.

4. Pathlength, $L_r = \sum_f \delta l$.

5. Flow-related transport resistance, $F_r = \sum_f \frac{2w_f \delta l}{Q_f} = \sum_f \frac{2t_{rf}}{e_{fj}}$, where t_{rf} is the travel time in a fracture along the path.

The results from the particle tracking are used to produce ensemble statistics for the performance measures, as well as locating the discharge areas. The ensemble is over the set of 8,031 particle start locations, one for each deposition hole and is in total divided over three blocks; block 1 with 2,158 start locations, block 2 with 3,576 start locations and block 3 with the remaining 2,297 start locations (Figure 3-13). Apart from the work done on the repository layout, no further attempt is made to avoid starting particles in either deterministic fracture zones or high transmissivity stochastic fractures. In reality, such features are likely to be avoided during repository construction, and hence the model may tend to see particles start in a wider range of possible fracture transmissivities than might be encountered in reality.

To avoid particles becoming stuck in regions of stagnant flow, they are not started if the initial flow rate per unit width is less than $1 \cdot 10^{-6}$ m²/y for Q1 and Q2 and the initial Darcy flux is less than $1 \cdot 10^{-6}$ m/y for Q3. For Q1 and Q2, flow rate per unit width, q_f , in a fracture is defined as

$$q_f = e_{fj} v = \frac{Q_f}{\sqrt{a_f}} \quad (3-6)$$

where:

- e_{fj} is the transport aperture of the fracture [m].
- v is the velocity [m/y].
- Q_f is the volumetric flow rate in the fracture [m³/y].
- a_f is the area of the fracture plane [m²].

For Q3, the Darcy flux, q , is defined as the volumetric flow rate per unit area.

Table 2-2. Summary of reported performance measures.

| Performance measure | Description |
|---------------------|--|
| t_r | Travel time in the rock [y]. |
| U_r | Initial Darcy flux in the rock [m/y]. |
| L_r | Path length in the rock [m]. |
| F_r | Flow-related transport resistance in the rock [y/m]. |
| t_t | Travel time in the tunnels [y]. |
| U_t | Initial Darcy flux in the tunnels [m/y]. |
| L_t | Path length in the tunnels [m]. |
| t_{EDZ} | Travel time in the EDZ [y]. |
| U_{EDZ} | Initial Darcy flux in the EDZ [m/y]. |
| L_{EDZ} | Length in the EDZ [m]. |

NUMOにおける地質環境のモデル化技術の 高度化に向けた取組み状況

Current status of NUMO's studies to improve
geological environment modeling technology

2022年5月17日（火）

原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan

技術部 調査技術グループ

尾上 博則

Hironori ONOE

■ 技術開発の課題

Technical issues

■ トピックス 1: 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化

Topics 1: Improvement of modeling technology for long-term evolution of geological environment

■ トピックス2 : 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備

Topics 2: Development of methodologies for validation of groundwater flow and mass transport model

■ まとめ

Summary

地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～平成34年度)(地層処分研究開発調整会議, 2018)における研究課題

- 
- 包括的技術報告書*¹ (NUMO-TR-20-01) を作成する過程で明らかとなった課題
 - これまでの研究開発過程で抽出された課題
 - 国の審議会等*²で抽出された課題
 - 科学的特性マップ^oの作成及び提示に際して寄せられた技術的信頼性に関する国民からの声等も含めて網羅的に課題を抽出

全体計画のうち、事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等の観点から、NUMOが実施する技術開発の項目や技術開発工程等を整理*³

- 地質環境特性の**長期変遷のモデル化技術**の高度化
Improvement of **modeling technology for long-term evolution** of geological environment
- 地下水流動・物質移行**モデルの妥当性確認手法**の整備
Development of **methodologies for validation** of groundwater flow and mass transport model

*¹最新の科学的知見やこれまでの技術開発成果に基づき、サイトを特定せず、わが国における安全な地層処分の実現性について総合的に検討した報告書

*²「地層処分技術 WG」、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」、「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」等

*³地層処分事業の技術開発計画(2018年度～2022年度)改訂版 (NUMO-TR-20-05)



トピックス 1:

地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化

Topics 1:

Improvement of modeling technology for long-term evolution of geological environment

- 包括的技術報告書では、日本の代表的な岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）を対象に三次元の地質環境モデルを構築し、それに基づき処分場の設計や安全評価を実施
- 将来の水理場及び化学場といった地質環境特性の変化の幅等を推定し、その結果を処分場の設計や安全評価に反映するために、これらと連携しつつ、地質環境特性の長期変遷のモデル化技術を整備することが課題

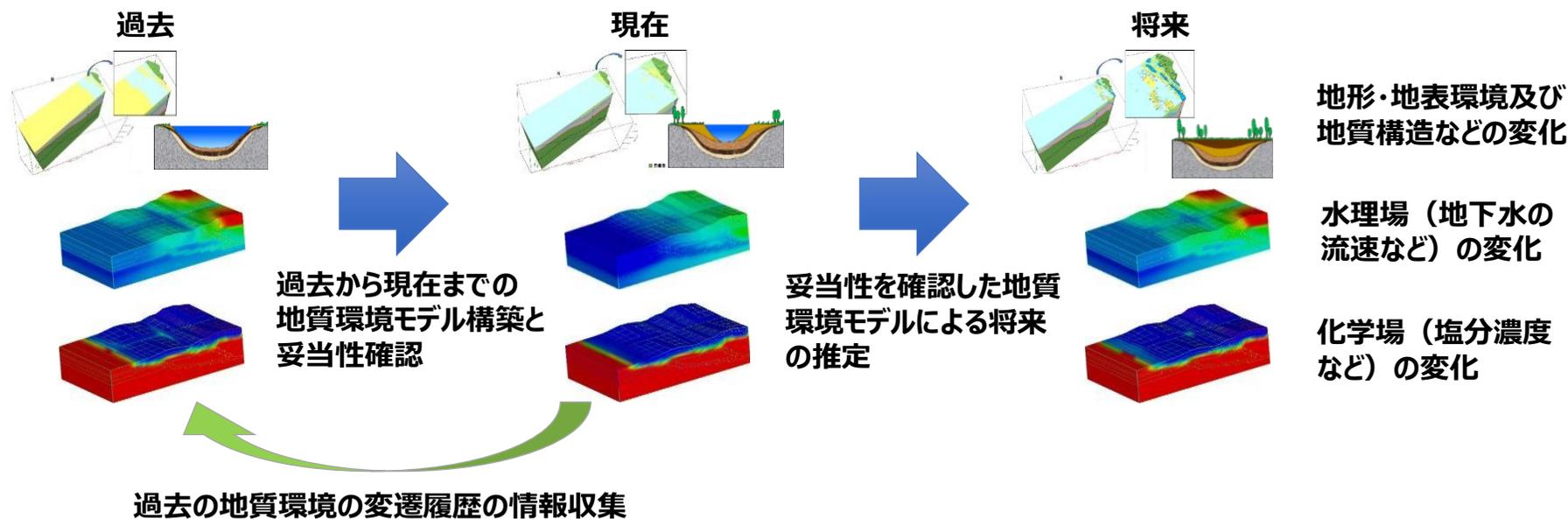


Image of modeling approach for long-term evolution of geological environment

- より信頼性の高い、現実に即した処分場の設計や安全評価に資するために、長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地表から地下深部までの水理場や化学場といった地質環境特性の変化を考慮した、四次元地質環境モデル（三次元空間に時間軸を考慮したモデル）の構築技術を整備する。
- To develop a technology for the 4D site descriptive modeling (the model has 3D space and time scale) that takes into account changes in characteristics of geological environment such as hydraulic and hydrochemical conditions from the surface to deep underground due to long-term topography and climate changes, in order to reflect for more reliable and realistic underground repository design and safety assessment.

- 包括的技術報告書で示した三岩種（新第三紀堆積岩類、深成岩類及び先新第三紀堆積岩類）を対象として、四次元地質環境モデルを構築し、モデル構築に係る作業手順や考え方、処分場の設計や安全評価に提供する情報の整理を実施
 - ✓ 全国規模の文献情報に基づき、仮想地域における現在から将来100万年間を対象とした地形及び地質構造の長期変遷モデルを構築
 - ✓ 気候・海水準変動による解析条件の連続的な変化を考慮した非定常状態における地下水流動・物質移行解析を実施
 - ✓ 処分場地下施設の設置可能領域を選定する際の留意点や考え方を整理するなど、解析結果を処分場の設計及び安全評価に反映する方法について検討

深成岩類を対象としたモデル化・解析の事例を紹介

- 河川争奪などによる河川水系の時間的変遷に関する情報や知見を収集するとともに、河川水系の変遷を伴う広域的な地形変化や三岩種が混在する地形・地質構造条件を考慮した、より複雑な地質環境を対象としたモデル化・解析を実施中

現在の地形モデル及び三次元地質構造モデルの構築

Construction of topographic and 3D geological models at present

● 地形・地質構造の概念モデルの構築

- ✓ 包括的技術報告書で整理された深成岩類の概念モデルを適用

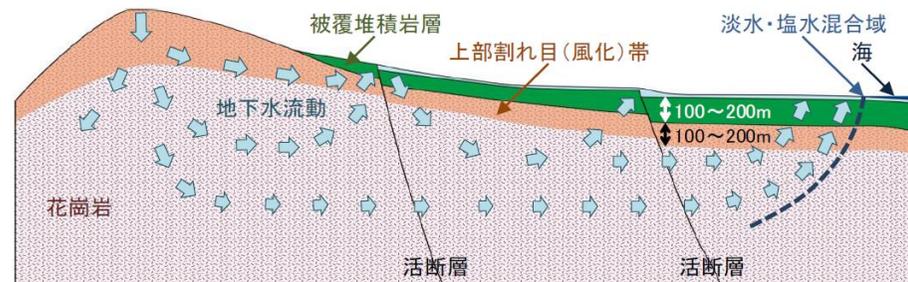
● 既存情報の収集・整理とモデル化

- ✓ 花崗岩が分布する地域の既存情報に基づき、代表岩種の面積比及び個別岩体の形状、伸長方向等の地形・地質構造のモデル化に必要なパラメータを整理し、数値化
- ✓ 数値化した情報を統合し、モデル化

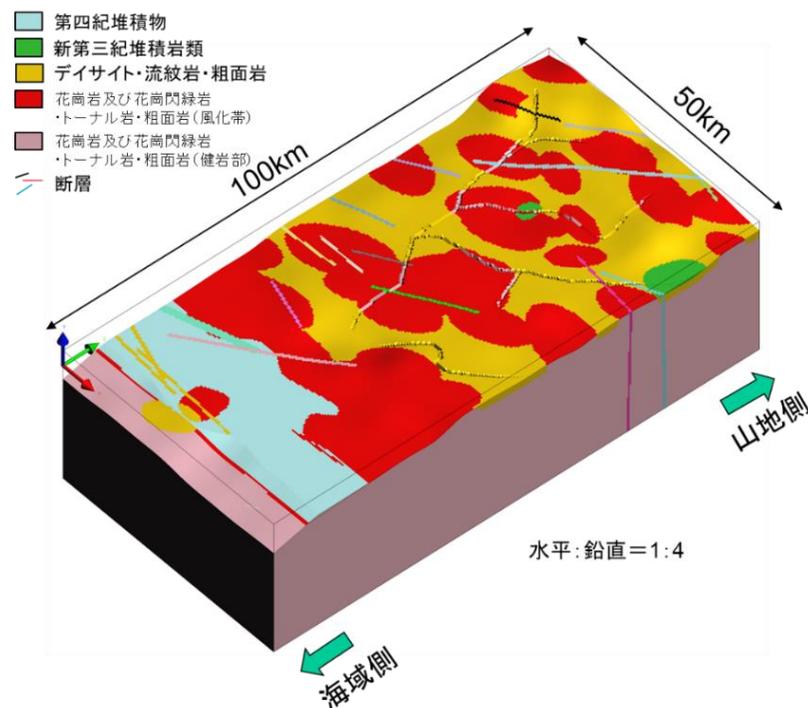
Area ratio of representative rock types

| 地帯 | 花崗岩 | 花崗閃緑岩・トータル岩・粗面岩 | デイサイト・流紋岩・粗面岩 |
|-----|-----|-----------------|---------------|
| 地帯A | 46 | 14 | 40 |
| 地帯B | 41 | 5 | 54 |
| 地帯C | 54 | 42 | 4 |

シームレス地質図（構造区分⑤）



Conceptual model of groundwater flow



Topographic and geological model

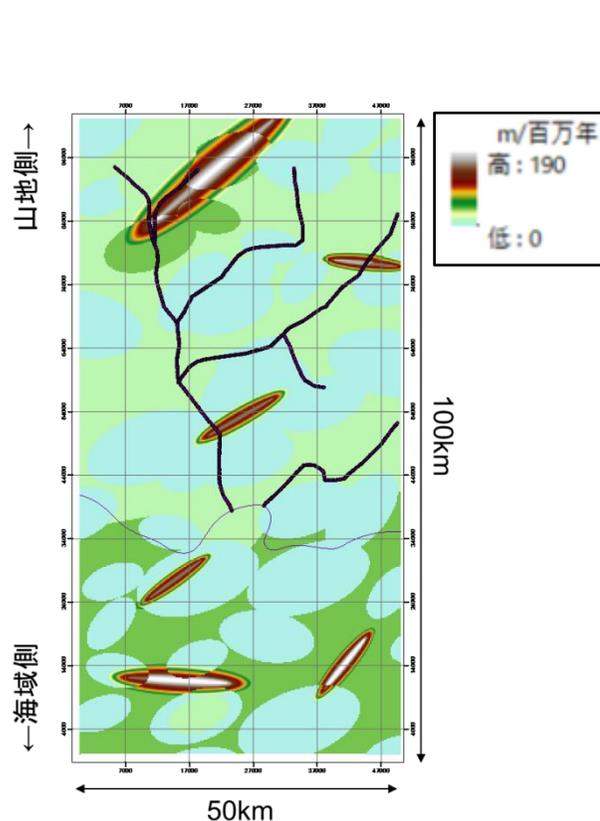
現在モデルの構築に考慮すべき地形・地質構造要素の抽出方法や、モデル化に必要なデータ及びデータの解釈や統合化に係る考え方・手順を整理

将来100万年間を対象とした地形モデル及び三次元地質構造モデルの構築

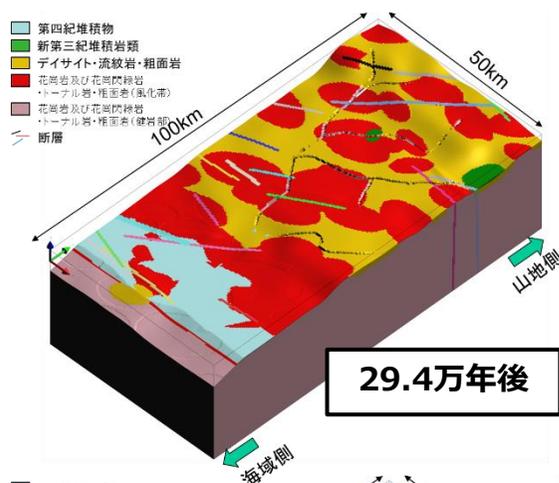
Construction of topographic and 3D geological models for 1 My in the future

● 既存情報の収集・整理とモデル化

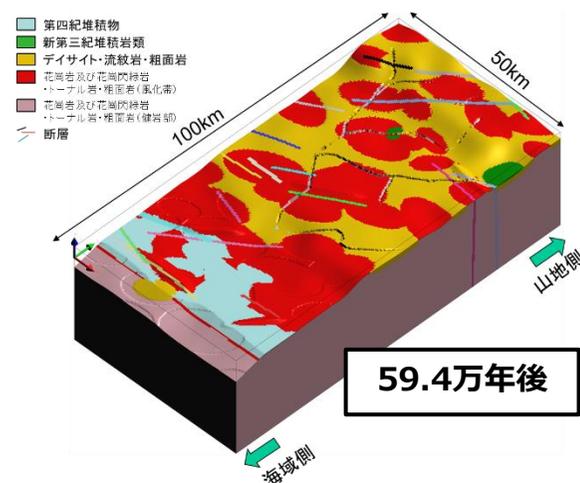
- ✓ 隆起（沈降）、侵食（堆積）などの地形変化パラメータを整理し、数値化
- ✓ 数値化した情報を統合し、モデル化



Parameter setting of Uplift velocity

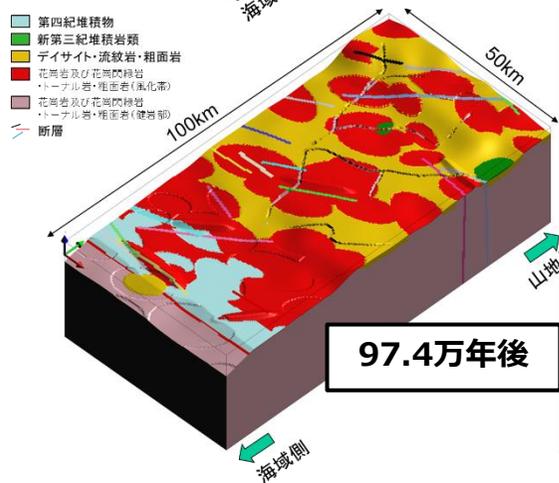


29.4万年後



59.4万年後

Topographic and geological model in the future



97.4万年後

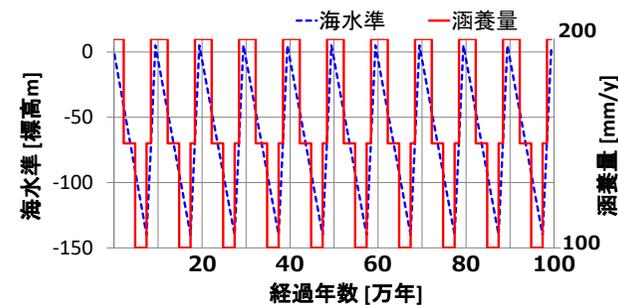
将来モデルの構築に考慮すべき時間断面の設定方法や、モデル化に必要なデータ及びデータの解釈や統合化に係る考え方・手順を整理

非定常状態における地下水流動・物質移行解析の実施

Transient simulation of groundwater flow and mass transport

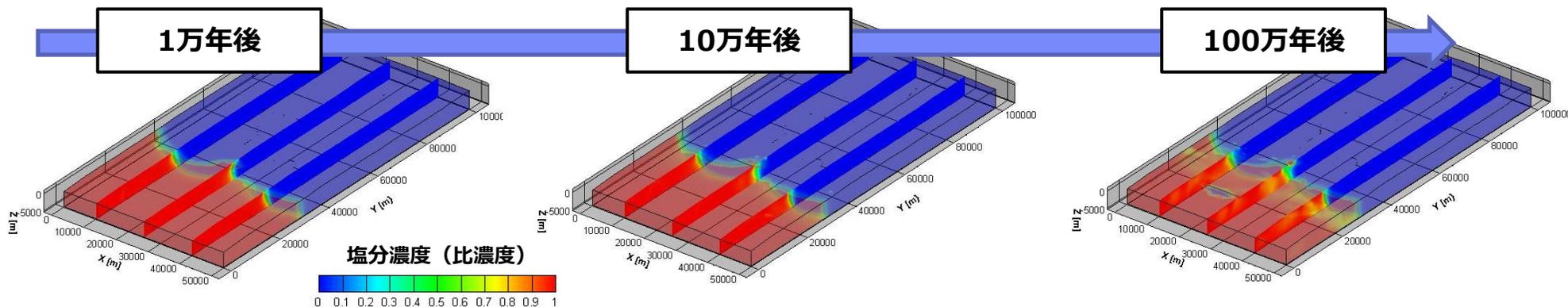
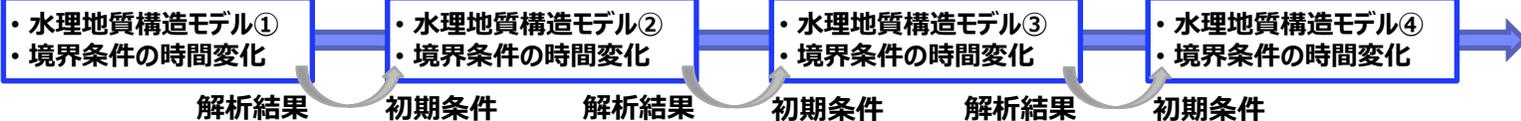
● 既存情報の収集・整理と解析

- ✓ 地下水流動・物質移行解析の解析条件（境界条件やその時間変化）を設定
- ✓ 長期にわたる地形変化や気候・海水準変動に伴う地下水の流速分布や塩分濃度分布などの変化を連続的に推定



Boundary conditions of sea level and recharge rate

地質環境特性の時間変遷を考慮した解析手法



Estimation results of groundwater salinity distribution change

地質環境特性の時間変遷を考慮した解析を実施するための領域設定、境界条件などの設定や、解析パラメータの設定に係る考え方を整理

処分場地下施設設置可能領域の選定

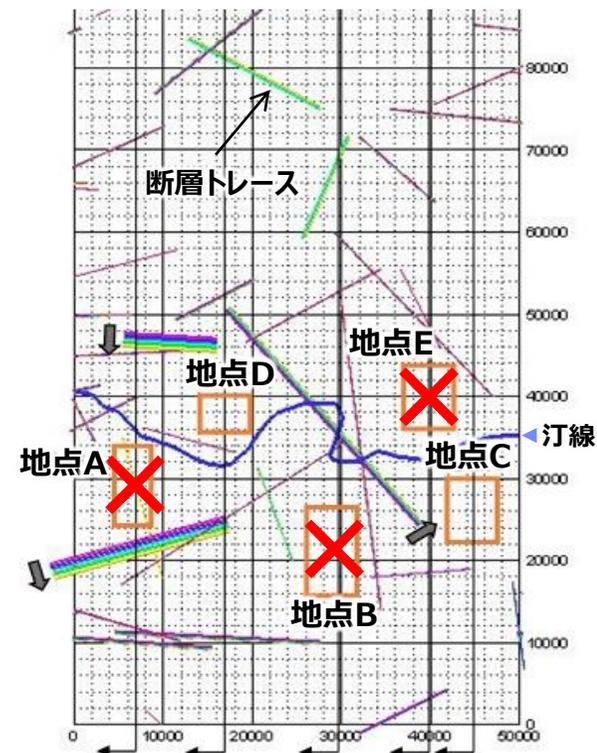
Site selection of potential areas for underground repository facilities

- 候補母岩の広がりや断層などの地質構造の分布、地点ごとの地下水・物質移行特性に基づき選定

| 岩種 | 深成岩類 | |
|------------------------|--|------------------|
| 処分場の候補母岩 | 花崗岩・花崗閃緑岩 | |
| 処分場地下施設設置可能領域候補地点の選定条件 | <ul style="list-style-type: none"> ● 現海岸線から海域20km、陸域20km程度の範囲 ● 長さ10km以上の断層（活断層相当）が分布しない場所 ● 複数の断層の連結可能性を考慮して、離間距離5km以内に同一走向・傾斜方向の断層が一直線に分布しない場所 ● 地形変化量が小さい場所 | |
| 候補地点 | 【沿岸海域】 ● 地点A、B、C | 【内陸部】 ● 地点D、E |

候補地点の地下水・物質移行特性の評価

| 処分場地下施設設置可能領域 | 沿岸海域 | 内陸部 |
|--|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> ● 地点Bは、断層が交差するように分布するため、地上設備やアクセス坑道の配置の観点から除外 ● 地点Aと地点Cの地下水移行時間に大きな差がないこと、地点Aの深部に断層が伏在することから、地点Cを選定 | <ul style="list-style-type: none"> ● 地点Dと地点Eの地下水の移行時間に大きな差がないこと、地点Dの地表地形の方が地上施設の配置が容易なことから、地点Dを選定 |
| <ul style="list-style-type: none"> ● 施設の設置深度：深度毎に有意な差がみられないことから、経済合理性や保守的な評価の観点から最も浅い標高-500mと設定 | | |



断層トレース：深度方向に100m間隔で表示

Location of fault distribution and potential areas

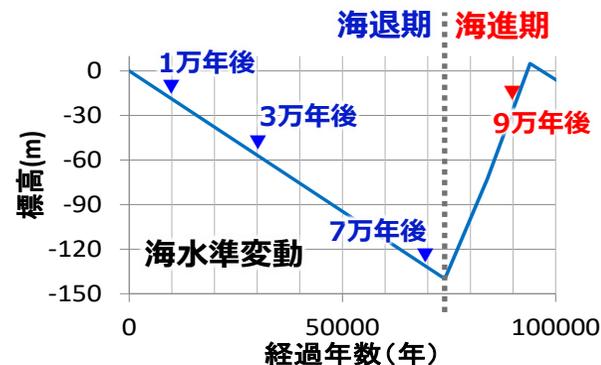
モデルや解析結果に基づき、処分場地下施設設置可能領域を選定する際の留意点や考え方を整理

処分場地下施設設置可能領域の選定のための地下水・物質移行特性評価

Characterization of groundwater flow and mass transport for site selection of potential areas

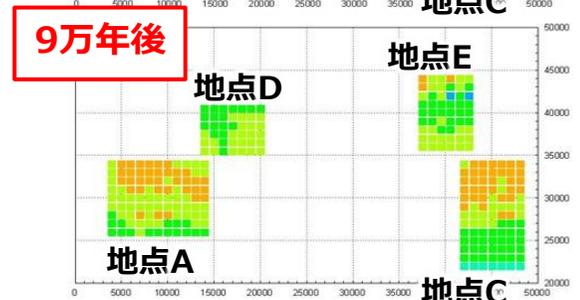
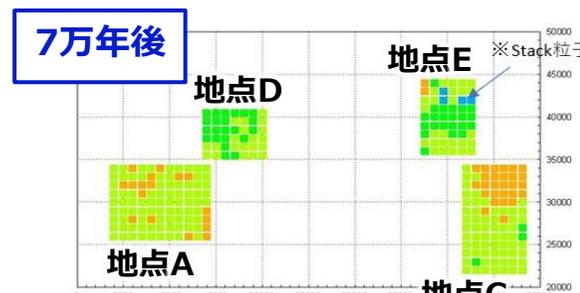
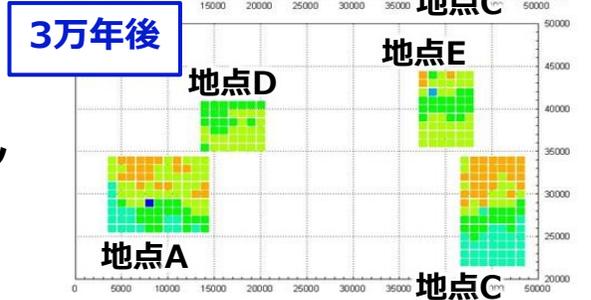
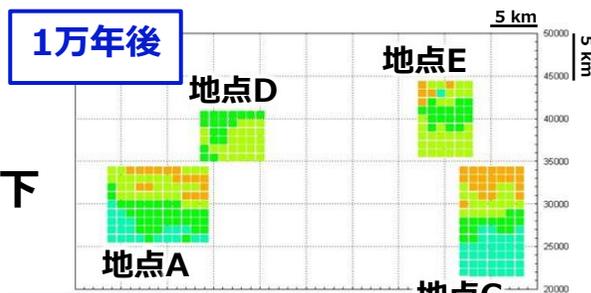
● 処分場地下施設設置可能領域の候補地点を対象として粒子追跡線解析を実施

| 岩種 | | 深成岩類 |
|-----------------|-----------|---|
| 地下水・物質移行特性の検討条件 | 粒子の出発点の配置 | <ul style="list-style-type: none"> ● 水平方向：200m間隔 ● 深度方向：5深度（標高-500m~-1,000m；100m間隔） |
| | 地下水流動場 | <ul style="list-style-type: none"> ● 1万年毎の定常地下水流速場 |
| | 評価期間 | <ul style="list-style-type: none"> ● 現在から約10万年後まで（海水準変動の1サイクル(海退期, 海進期)を考慮) |



地下水移行時間の比較・評価

- 沿岸海域（地点A、C）
 - ✓ 海退期：移行時間は短くなる（海底下の拡散場から陸域の移流場に変化）
 - ✓ 海進期：移行時間は長くなる
- 内陸部（地点D、E）
 - ✓ 海退期、海進期ともに大きな変化なし



処分場地下施設設置可能領域を選定する際に実施する地下水・物質移行解析の仕様や結果の分析方法を整理

粒子の出発地点にて表示

粒子配置深度；標高-500m



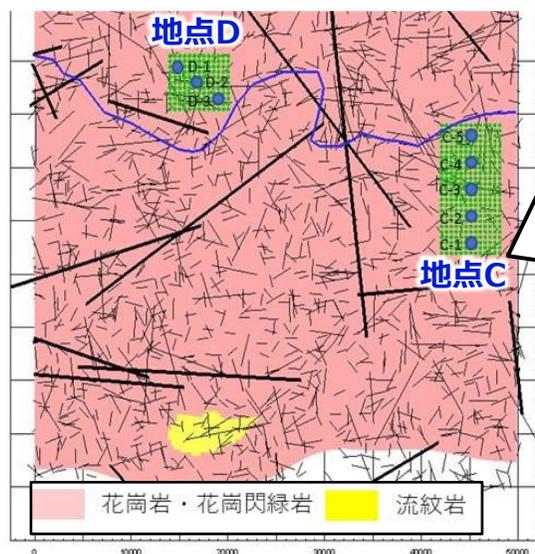
Distribution of groundwater travel time

処分場地下施設設置可能領域における地下水・物質移行特性評価

Characterization of groundwater flow and mass transport in the potential areas

● 処分場地下施設設置可能領域を対象としてより詳細な粒子追跡線解析を実施

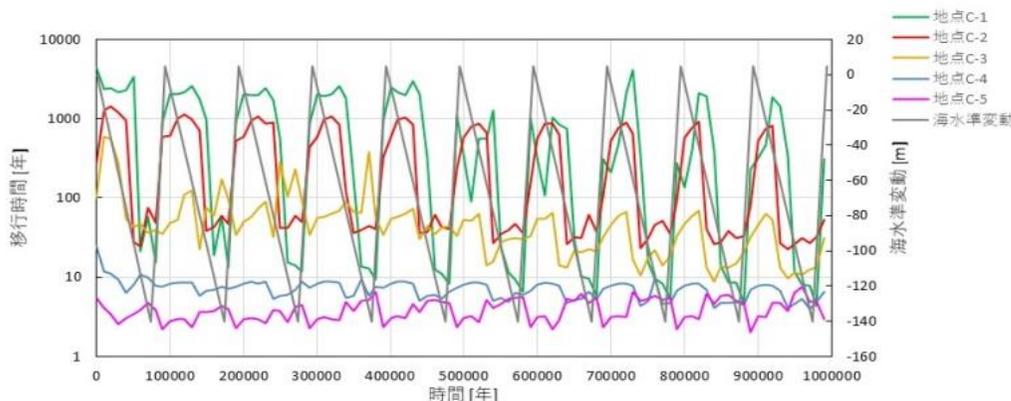
| 岩種 | | 深成岩類 |
|---------------------|--------|---|
| 地下水・物質移行 特性の検討条件 | 粒子の設定 | <ul style="list-style-type: none"> ● 地点Cと地点Dの領域内に、粒子の出発点を水平方向に500m間隔に配置（配置深度：標高-500m） ● 上記の配置条件で、1万年毎に粒子を投入 |
| | 地下水流動場 | <ul style="list-style-type: none"> ● 地形変化や気候変動を考慮した非定常地下水流速場 |
| | 評価期間 | <ul style="list-style-type: none"> ● 現在から約100万年後まで |



Location of starting points for particle tracking analysis

● 地点C（沿岸海域）

- ✓ 汀線付近（C-5）では、数年オーダーと移行時間が短く、海水準変動の影響も小さい
- ✓ 汀線から離れると（C-1、C-2）、海水準変動の影響を受けて数十年～数千年オーダーの範囲で変動



Long-term changes of groundwater travel time

安全評価に提供する情報を得るための地下水・物質移行解析の仕様や結果の分析方法の考え方を整理

安全評価に資するための地質環境特性に係る情報整理

Compilation of information on geological environmental characteristics for safety assessment

● 処分場地下施設設置可能領域のうち、地点Cの情報整理の一例

| 時間枠 | (万年) | 0~7.4 | 7.4~9.4 | 9.4~100 | |
|---------------|--|---------------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| 解析モデルの参照時間断面 | (万年) | 1, 3, 5, 7 | 9, 10 | 17 (最大海退), 20 (最大海進), 57 (最大海退), 60 (最大海進), 87 (最大海退), 90 (最大海進) | |
| 相対海水準変動 | | 海退期 | 海進期 | 海退期 | 海進期 |
| 沿岸海域 (地点C) | 地質環境変動イベント | 隆起 (常時海) ※処分場の上昇は解析モデル上考慮しない | | | |
| | 水理場 (移行時間) | 【沿岸付近】 ・大きな変化なし (数年オーダー) | | | |
| | | 【沿岸遠方】 ・短くなる傾向 (数千→十数年) | 【沿岸遠方】 ・長くなる傾向 (十数年→数千年) | 【沿岸遠方】 ・短くなる傾向 (数年~数十年に変化) | 【沿岸遠方】 ・長くなる傾向 (数百~数千年に変化) |
| | 化学場 (塩分濃度) | 【沿岸付近】 淡水環境が維持 | | | |
| | | 【沿岸遠方】 ・塩水環境→淡水環境 | 【沿岸遠方】 ・淡水環境→塩水環境 | 【沿岸遠方】 ・塩水環境→淡水環境 | 【沿岸遠方】 ・淡水環境→塩水環境 |
| 地質環境の不確実性 | <ul style="list-style-type: none"> ・長期的な相対海水準変動量の不確実性：水理場，化学場（塩分濃度）に影響を及ぼす ・1サイクル目の海進/海退期における相対海水準の変動量の不確実性：化学場（塩分濃度）に影響を及ぼす | | | | |

時間枠ごとの処分場地下施設設置可能領域から生活圏インターフェイス (GBI) までの範囲における水理場及び化学場 (移行経路沿いの局所的な流速分布や塩分濃度分布) の状態及びその不確実性の整理を試行



今後の取組み Future works

- **引き続き、四次元地質環境モデルに表現する地質環境情報の内容を検討するとともに、地質環境の時間変遷を考慮した地下水流動・物質移行解析結果を、処分場の設計及び安全評価に反映する方法の検討を実施する。**
- **事例検討地域を対象とした過去から現在にかけての地質環境の変遷を考慮したモデル化及び解析作業を通じて、四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性確認を実施する。**
- **特定のサイトを対象とした、より現実的な処分場の設計や安全評価に反映するための四次元地質環境モデルの構築に必要なデータや調査項目、モデル構築の際に着目すべき点や留意事項を含む作業手順等を体系的に取りまとめる。**
- The data and investigation items required for the construction of the 4D site descriptive model, important matters and work procedures for the model construction will be organized, and the modeling technology will be systematized.



トピックス 2:

地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備

Topics 2:

Development of methodologies for validation of groundwater flow and mass transport model

- 概要調査段階以降における処分場の設計及び閉鎖後長期の安全評価では、地下水流動・物質移行モデルを用いた数値シミュレーションが実施されるが、地下水流動や物質移行の場となる地質環境は、岩盤中に分布する断層や割れ目等によって不均質であるため、数値シミュレーションに必要となる水理・物質移行パラメータや境界条件を完全に把握することは難しい。
- 不均質な岩盤における割れ目のモデル化には割れ目ネットワークモデル（以下、DFNモデル）といった確率論的な手法が適用されるが、上記に示した地質環境の理解の不完全性は、原位置で取得したデータとの単純な比較によるモデルの妥当性の確認を困難にさせる要因にもなっている。
- そのため、数値シミュレーションに用いるモデルの構築だけでなく、構築したモデルの妥当性確認の考え方や手順といった方法論の整備が必要である。

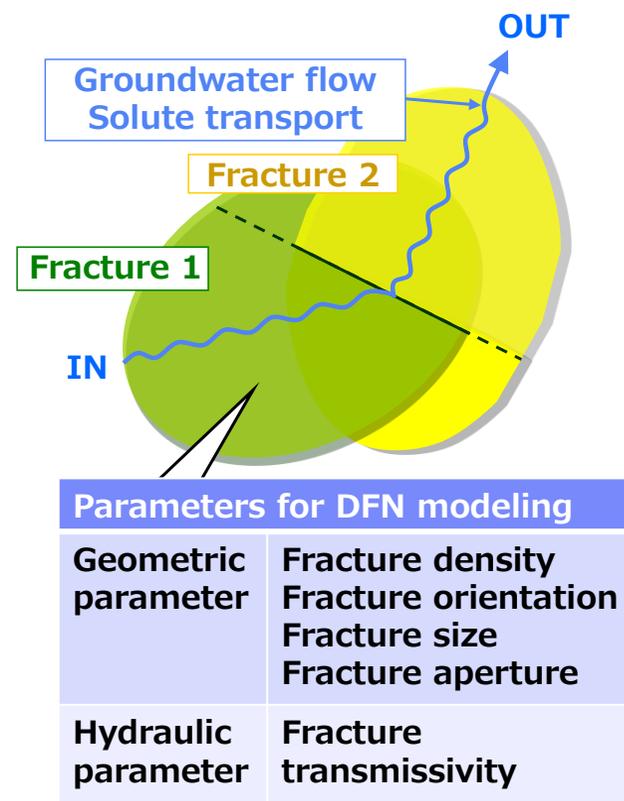


Image of DFN modeling

目的 Aim

- 不均質性を有する岩盤を対象とした地下水流動・物質移行評価結果の信頼性を示すための、調査、地下水流動・物質移行のモデル化・解析及びモデル化・解析結果の妥当性評価の具体的な考え方を構築する。
- To develop specific methodology for investigation, modeling and analysis of groundwater flow and mass transport, and validation of modeling and analysis results to demonstrate the reliability of groundwater flow and mass transport assessment results for rock mass with heterogeneous.

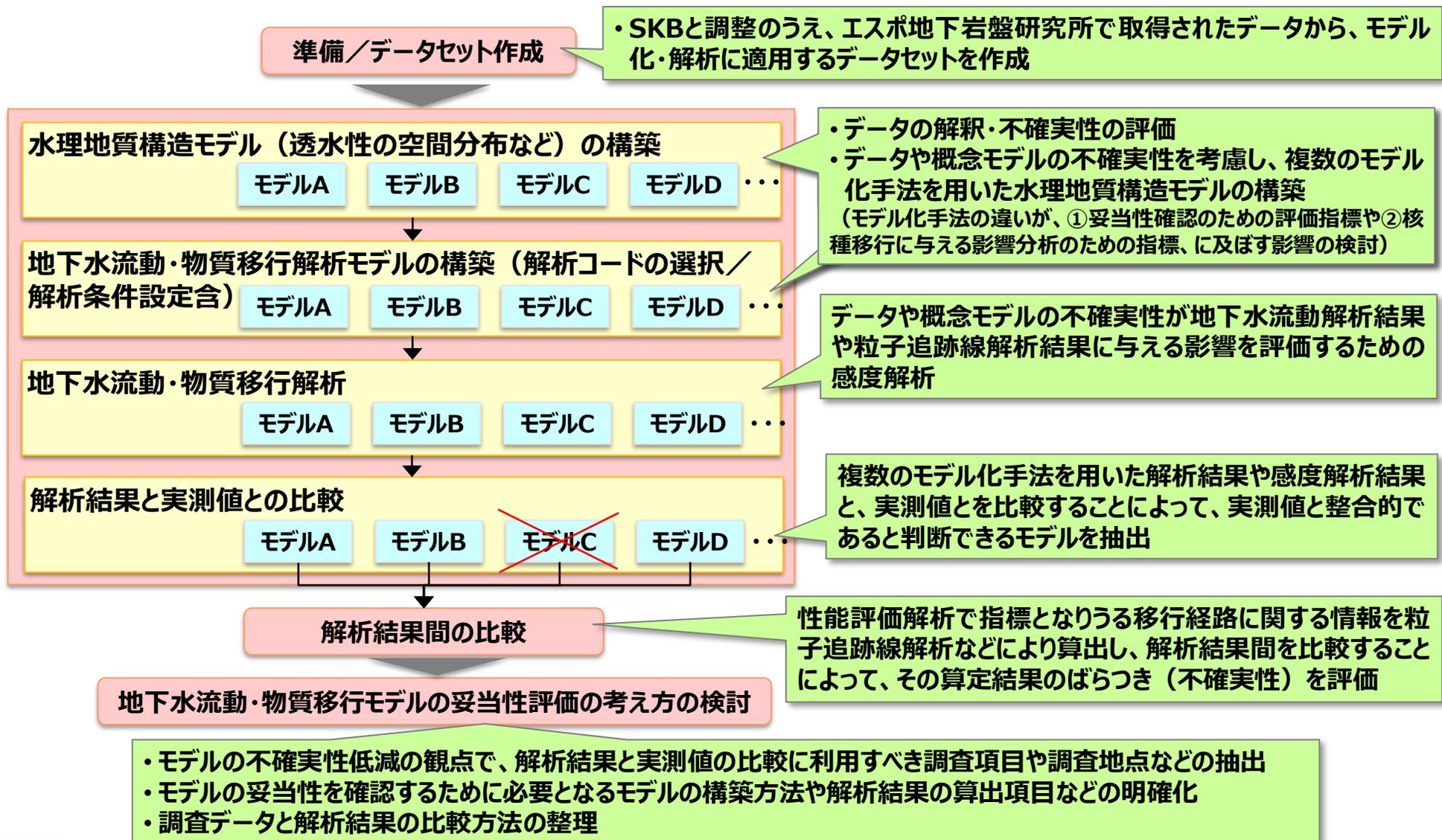
これまでの主な検討内容 Previous studies

- 地質環境がよく理解され、体系的な調査によって十分なデータが揃っていると期待された、エスポ地下岩盤研究所を事例として複数の手法を用いた岩盤の不均質性のモデル化・解析を行い、それぞれの手法の特徴や適用性・課題を抽出

 エスポ地下岩盤研究所を対象としたモデル化・解析の事例を紹介

検討アプローチ Approach of this study

● SKB Internationalとの協力協定に基づき入手したデータを用いた検討を実施

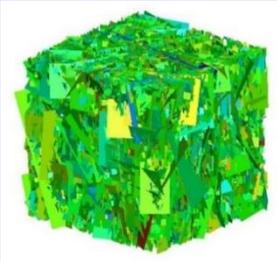
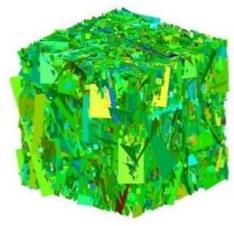
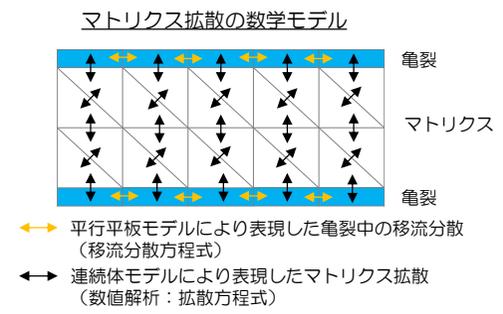
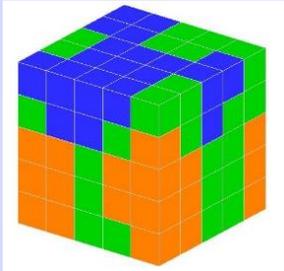


適用したモデル化手法 Modeling methods

● 水理地質構造の概念が異なる3種類のモデル化手法を適用

・DFN：高透水性割れ目を対象にモデル化
 ・ECPM：残りの割れ目は等価連続体近似(クラックテンソル法)でモデル化

DFNモデルを等価連続体近似(6方向の流量計算による最小二乗近似)でモデル化

| | 概念モデル① | 概念モデル② | 概念モデル③ |
|-------------------------|---|---|--|
| 水理地質構造 概念モデル | 割れ目ネットワークモデル (DFN)  | 二重透水・間隙モデル (DFN + ECPM)   | 等価不均質連続体モデル (ECPM)  |
| 地下水流動・ 物質移行の 表現方法 | <ul style="list-style-type: none"> 地下水は、割れ目を水みち(平行平板モデル)として移動 地下水に溶出した物質は、割れ目内を移流・分散により移動 | <ul style="list-style-type: none"> 割れ目ネットワークにマトリックスを多孔質媒体として考慮することで、地下水は割れ目とマトリックス(移流・拡散)を移動 地下水に溶出した物質は割れ目内とマトリックスを移流・分散・拡散により移動 | <ul style="list-style-type: none"> 地下水は不均質で透水異方性を有する多孔質媒体中をダルシー則で移動 地下水に溶出した物質は、上記の多孔質媒体中を移流・分散により移動 |
| モデル化・解析 手法(コード) | コード：ConnectFlow 開発元：英国・Wood. | コード：COMSOL 開発元：スペイン・AMPHOS21 | コード：HydroGeoSphere 開発元：カナダ・AQUANTY |

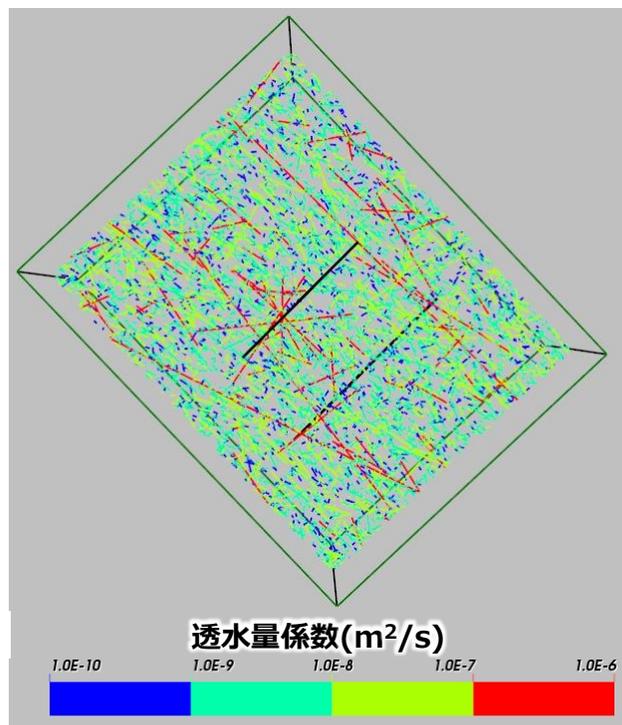
水理地質構造モデルの構築結果の一例

Results of hydrogeological modeling

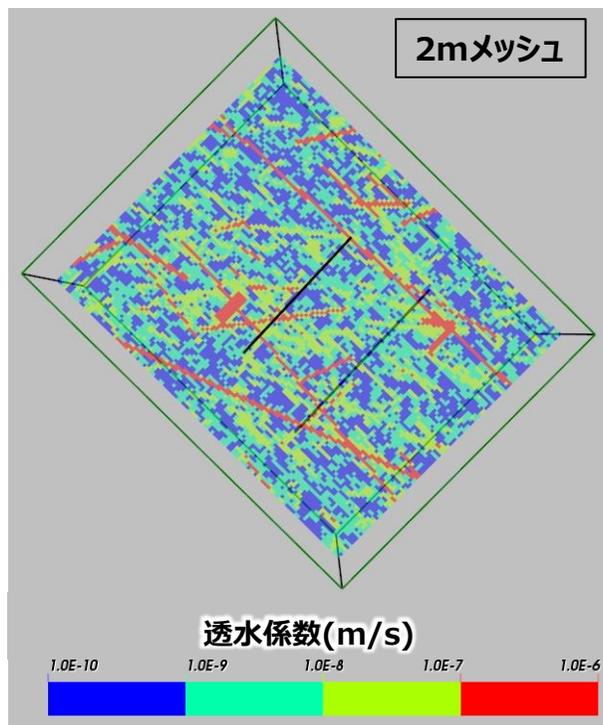
● モデル化手法の違いによる透水性の比較

- ✓ DFNの多孔質媒体近似においては、割れ目が交差していない場合でも、多孔質媒体に近似することで連続性が確保されるため、全体的な透水性は高くなる
- ✓ DFNからECPMへの変換の要素サイズが大きい場合は、より高透水性の割れ目が要素内に存在する確率が高くなり、相対的に透水係数の小さい要素が少なくなる

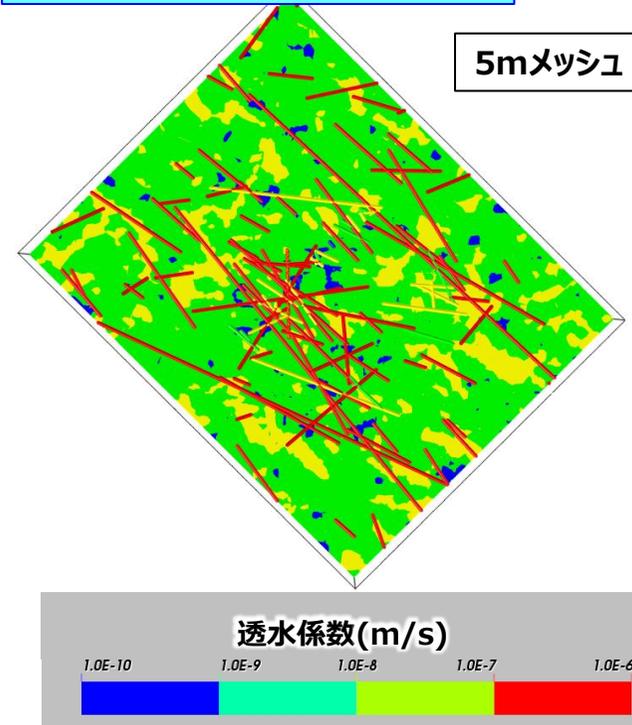
DFN/ConnectFlow



ECPM/HydroGeoSphere



DFN+ECPM/COMSOL

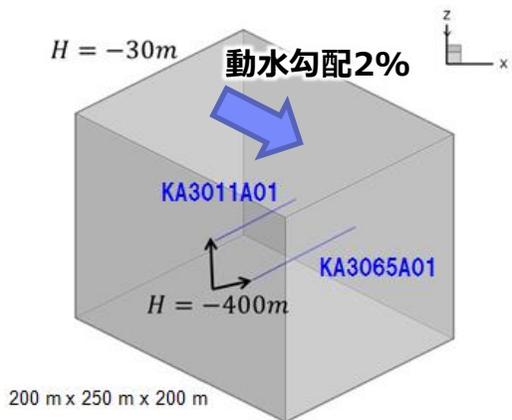


概念モデルの違いが粒子追跡線解析結果に及ぼす影響の一例

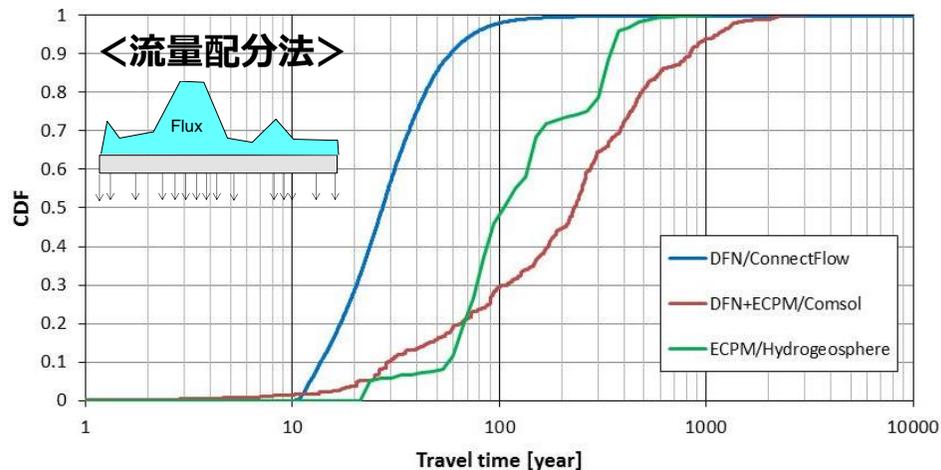
Effects of different conceptual models on the results of particle tracking analysis

● 粒子追跡線解析の実施

- ✓ パイロットボーリング直交方向に動水勾配2%を設定
- ✓ KA3011A01孔内に配置した10,000個の粒子を流量配分法で投入し、モデル下流端までの移行時間を算出



● 解析結果



概念モデル（モデル化手法）の違いが、解析結果に及ぼす影響の特徴や程度を確認

| 概念モデル | 結果 |
|----------|--|
| DFN | 全ての粒子は高透水性の割れ目から出発するので、初期到達、50%確率の移行時間が短い |
| DFN+ECPM | マトリクスから粒子が出発しているため、初期到達時刻、50%確率の移行時間が長い |
| ECPM | 割れ目ネットワークに伴う分散効果を同等に表す空間分解能でモデル化されていないため、移行時間のばらつきが相対的に小さい |

DFNモデルを用いた感度解析によるモデルパラメータの不確実性評価(1)

Uncertainty evaluation of model parameters by sensitivity analysis using DFN model

● 感度解析のケース設定

- ✓ データの不確実性やモデル化・解析入力パラメータ値の不確実性の分析結果に基づき、着目すべき不確実性因子を抽出し、それらを組み合わせて感度解析のケースを設定

【抽出した不確実性因子】

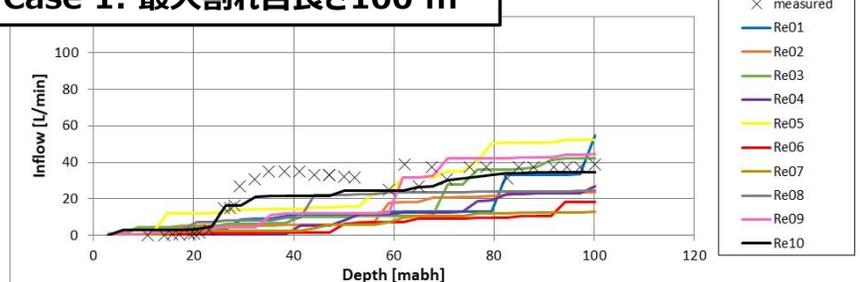
① 割れ目の卓越方位の区分方法、② 割れ目長さに関するべき乗数の設定方法、③ 最大割れ目長さ、④ 割れ目の透水量係数と長さとの関係（準相関もしくは無相関）

● 感度解析結果の一例（③最大割れ目長さに着目）

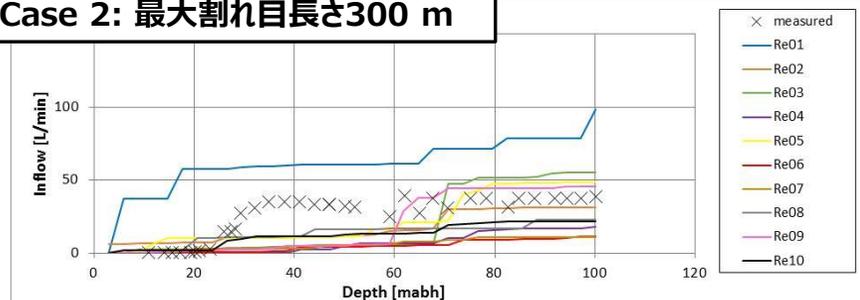
- ✓ 最大割れ目長さの設定値が、湧水量の推定結果に与える影響が大きい
- ✓ 最大割れ目長さを大きく設定することで、規模が大きく透水性の高い割れ目の遭遇確率が高くなり、実測値の再現性が向上
- ✓ ボーリング孔に遭遇する割れ目をコンディショニングすることで、湧水量の再現性が向上

モデル化・解析作業に内在する不確実性を抽出し、それらの不確実性の関連性や解析結果に及ぼす影響を整理

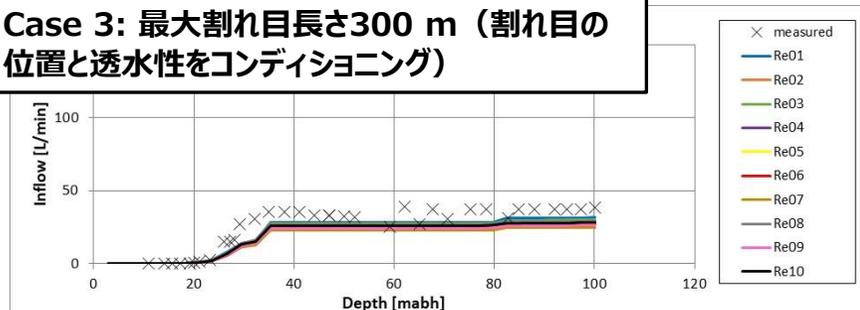
Case 1: 最大割れ目長さ100 m



Case 2: 最大割れ目長さ300 m



Case 3: 最大割れ目長さ300 m (割れ目の位置と透水性をコンディショニング)



Distribution of water inflow in the pilot borehole

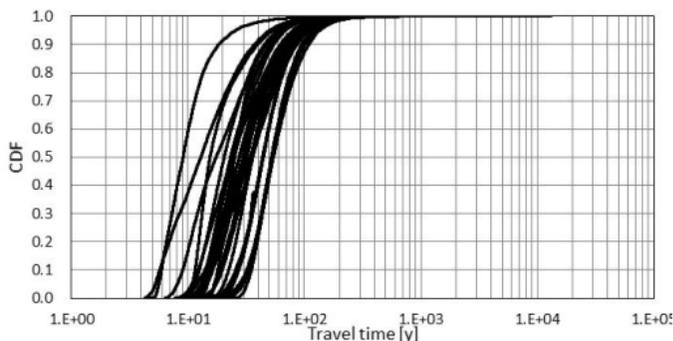
DFNモデルを用いた感度解析によるモデルパラメータの不確実性評価(2)

Uncertainty evaluation of model parameters by sensitivity analysis using DFN model

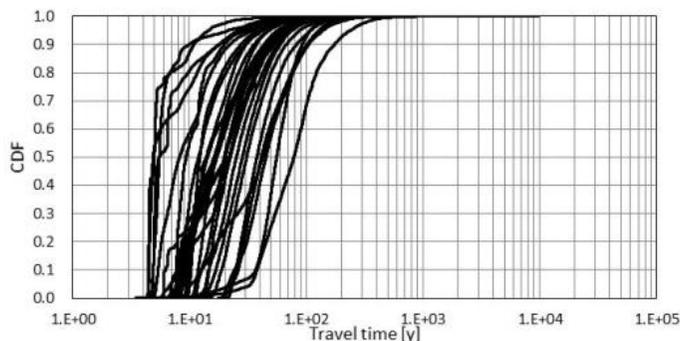
● 粒子追跡線解析の結果

- ✓ 最大割れ目長さの設定によって、地下水の移行時間分布が大きく異なる
- ✓ 最大割れ目長さを大きく設定することで、地下水の主要な移行経路となりうる規模が大きくかつ透水性の高い割れ目が発生する確率が高くなり、地下水の移行時間分布のばらつきが増加
- ✓ 割れ目をコンディショニングすることで、地下水の移行経路の選択肢が限定されるため、移行時間分布のばらつきが収斂する傾向

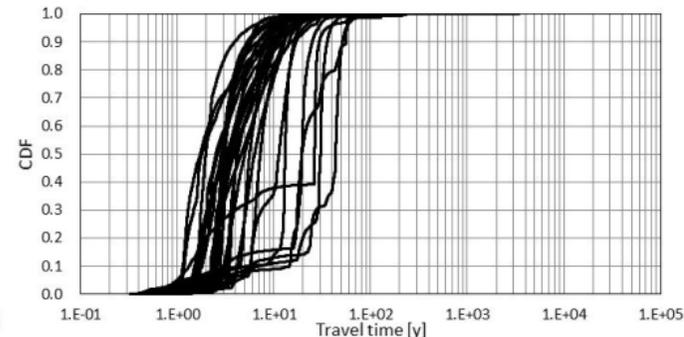
Case 1: 最大割れ目長さ100m



Case 2: 最大割れ目長さ300m



Case 3: 最大割れ目長さ300m (割れ目の位置と透水性をコンディショニング)



※30リアライゼーションの結果を表示

Distribution of groundwater travel time

地下水流動解析結果と粒子追跡線解析結果とを組み合わせた分析結果から、湧水量の再現性の程度が地下水の移行時間のばらつきに影響を及ぼしている可能性が示唆

- 日本特有の特徴である割れ目の密度が高い岩盤を対象に以下について検討し、モデルの妥当性確認の方法論を構築するための技術的な知見を蓄積する。
 - ✓ 瑞浪超深地層研究所で取得された公開データを用いて、百m規模の空間スケールの水理地質構造モデルの構築及び地下水流動・物質移行解析を実施
 - ✓ 上記のモデル構築及び解析に用いたデータの不確実性や作業仮説に内在する不確実性を洗い出し、それらの不確実性が妥当性確認に用いる解析結果に及ぼす影響を整理
- エスポ地下岩盤研究施設の事例検討結果と瑞浪超深地層研究所を事例とした成果とを比較・統合し、割れ目密度の高い日本の岩盤に対する手法として、モデルの構築及び妥当性確認に有効なデータ・調査項目・数量等に関する技術的知見や提言をまとめる。
- Through a case study of the Mizunami underground research laboratory, the effects of uncertainties in modeling and simulation of fractured rock on the model validation will be analyzed. Furthermore, technical knowledge and recommendations regarding data, investigation items and quantities to modeling and model validation for rock mass with high fracture density in Japan will be presented.

- **NUMOにおける地質環境のモデル化技術の高度化として、以下2つの技術開発課題に対する取り組みの現状を紹介**
 - ✓ **地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化**
 - ✓ **地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備**
- **今年度は、地層処分事業の技術開発計画(2018年度～2022年度)の最終年度であり、これまでに得られた技術的な知見や成果などを実用的な技術として取りまとめる。**
- **今後は、概要調査以降の地質環境特性評価に適用する調査・評価技術の信頼性向上に向けた技術の整備を着実に進める。**
- **In the future, we will synthesize the results of studies related to the Advancement of geological environment modeling technology, and steadily develop technologies for improving the reliability of investigation and evaluation technologies applied to geological environment characteristics for the preliminary investigations in geological disposal project.**



ご清聴ありがとうございました。

Thank you for your attention.

土木学会 エネルギー委員会主催
放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム
令和4年5月17日（於：土木学会講堂）

幌延地下研における立坑掘削時の水圧応答と 亀裂連結性の変化等に関する研究開発

Hydro-mechanical response during excavation
of shafts for the evaluation of fault hydraulic
connectivity

日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター 尾崎 裕介

Japan Atomic Energy Agency
Horonobe Underground Research Center
Yusuke Ozaki



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Geomechanics for Energy and the Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/gete



Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: An analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL

Yusuke Ozaki ^{a,*}, Eiichi Ishii ^a, Kentaro Sugawara ^b

^a Horonobe Underground Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Hokushin 432-2, Horonobe-cho, Hokkaido, 098-3224, Japan

^b Geoscience Research Laboratory, Yamato Higashi 3-1-6, Yamato, Kanagawa, 242-0017, Japan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 May 2021

Received in revised form 9 December 2021

Accepted 4 January 2022

Available online xxx

Editors-in-Chief:

Professor Lyesse Laloui and Professor Tomasz Hueckel

Keywords:

Fault hydraulic connectivity
Effective hydraulic conductivity
Shaft excavation
Hydraulic pressure monitoring
Mandel-Cryer effect

ABSTRACT

Faulted mudstones have low effective hydraulic conductivity if the faults have limited hydraulic connectivity. Therefore, the hydraulic connectivity of faults is a crucial consideration in the geological disposal of high-level radioactive waste. There is a simple method based on single-borehole investigations to classify domains of faults in mudstone as having either high or low hydraulic connectivity. However, the nature of the hydraulic connectivity's transition with depth around the boundary between domains of faults with high and low hydraulic connectivity remains poorly understood. At the Horonobe Underground Research Laboratory (Japan), three shafts have been excavated in a Neogene siliceous mudstone, and hydraulic pressure has been monitored at boreholes during the laboratory's construction and operation. This study analyzed long-term hydraulic pressure data to estimate the variation of effective hydraulic conductivity and explore the nature of the variation of fault hydraulic connectivity with depth around the predicted boundary (at ~400 m depth) between domains of faults with high and low hydraulic connectivity (with less connectivity below the boundary). As the observed hydraulic pressure was greatly affected by the Mandel-Cryer effect, numerical simulations considered poroelastic effects. They showed that the effective hydraulic conductivity gradually decreased from ~400 to ~500 m depth, becoming comparable with that of intact rock below ~500 m. Theoretical analysis of the observed data also indicated the same variation with depth. These results suggest that the hydraulic connectivity of faults does not change abruptly, but instead varies gradually over several tens of meters around the domain boundary.

© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

内容 Contents

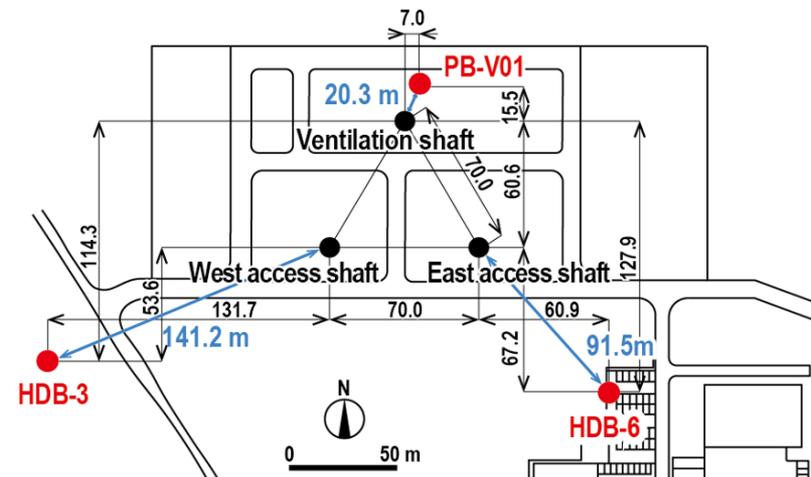
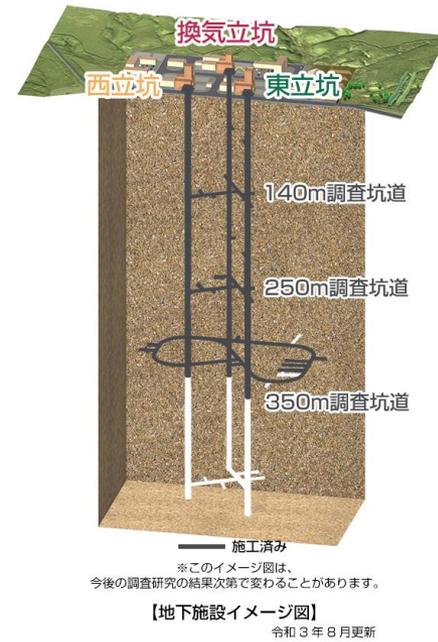
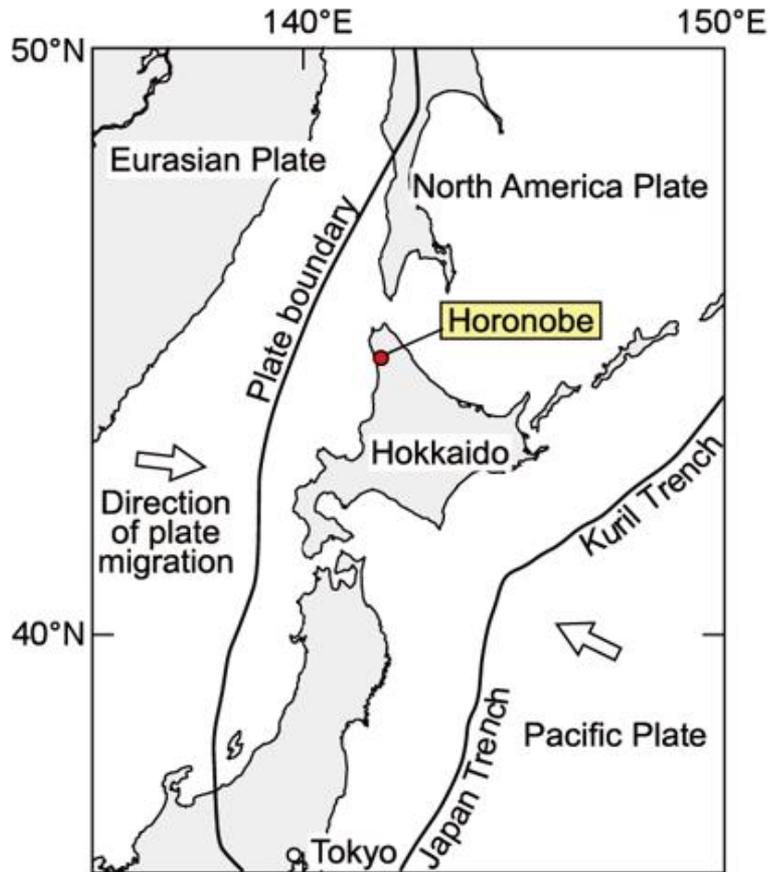
- 背景・目的
 - 研究対象と使用したデータ
 - 数値解析
 - 解析モデル
 - 感度解析（透水性）
 - 感度解析（力学特性）
 - 結論
- Objective of this study
 - Study site and data
 - Numerical simulation
 - Simulation model
 - Sensitivity analysis of effective hydraulic conductivity
 - Sensitivity analysis of mechanical properties
 - Conclusion and future study

背景・目的

Objective

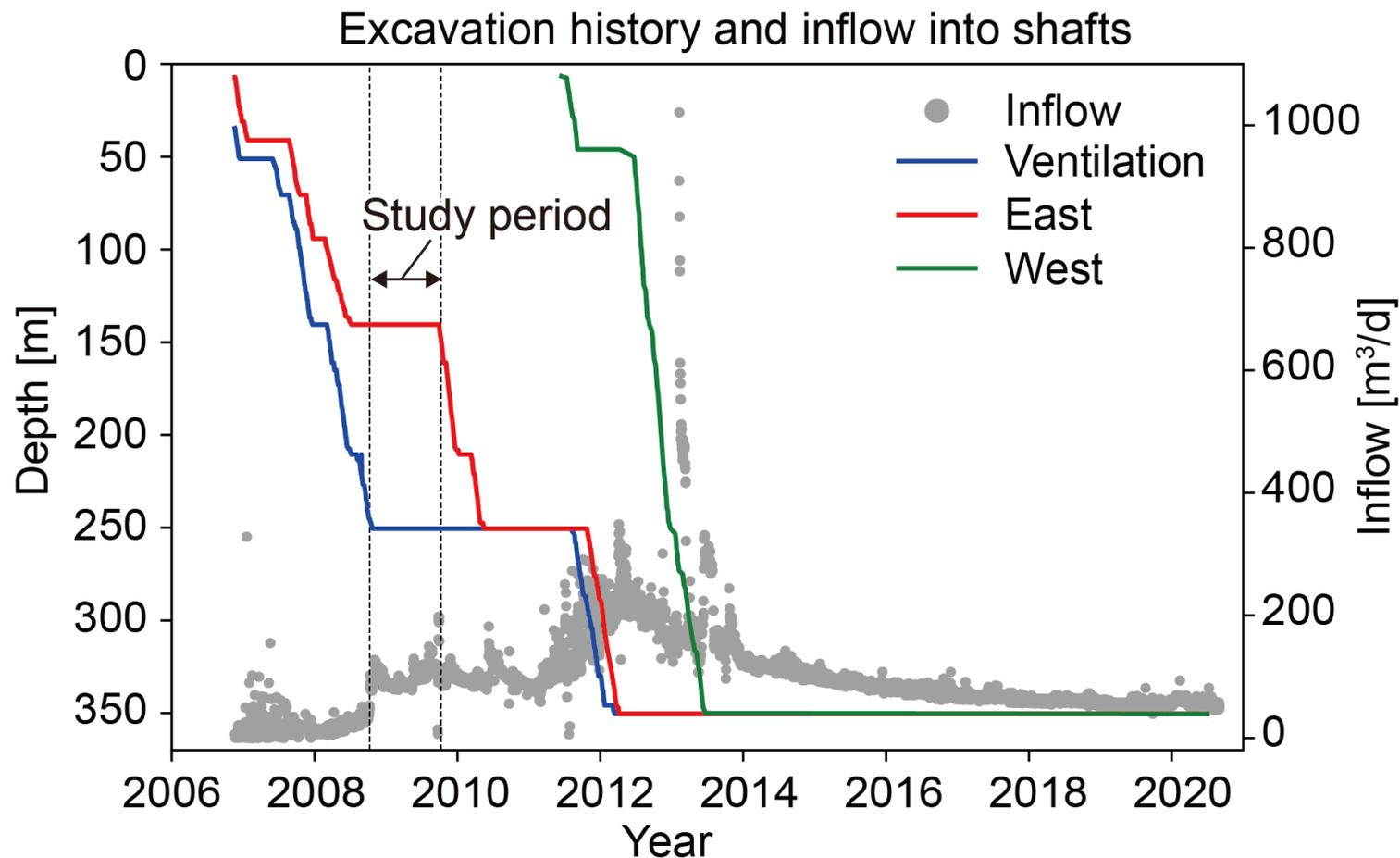
- 地層処分において低透水性の領域を検出する技術は重要である
- 先行研究では、断層の力学的な挙動に基づき、地下深部における堆積岩中の断層の連結性が乏しく透水性が低いことが予測されている
- 立坑掘削時の水圧応答の解析は、その応答の大きさから地下深部の低透水性領域の評価への利用が期待できることから、先行研究による低透水性の評価手法の実証に利用可能

調査場所 Study site



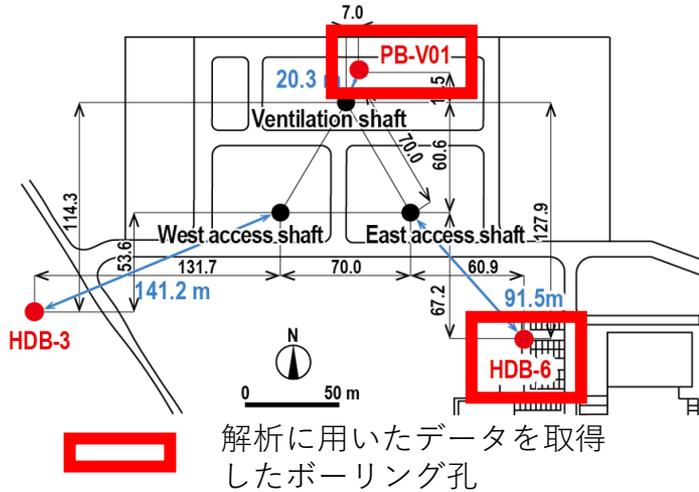
掘削と掘削時の湧水量

Excavation history and study period



掘削済みの深度および流量が概ね一定であり、モデル化が比較的容易なことからこれらのうち1年間(2008年10月 - 2009年10月)を解析の対象とする

立坑付近のボーリング孔 Studied data



解析対象：稚内層における水圧応答

PB-V01 未使用 使用

HDB-3

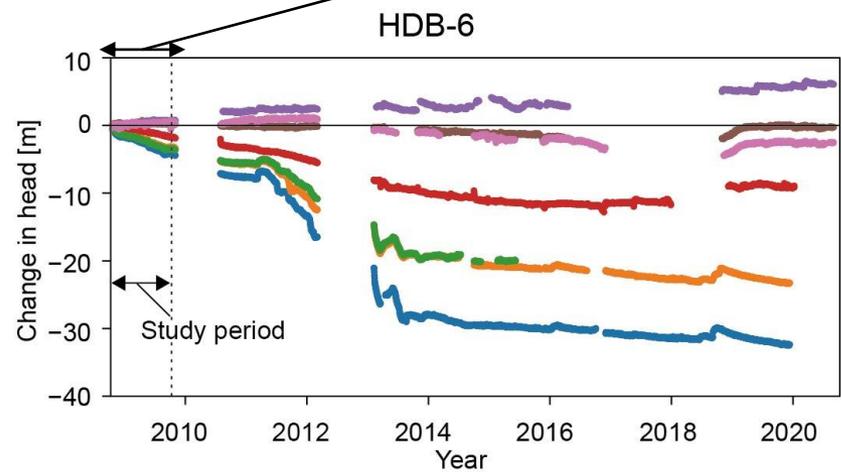
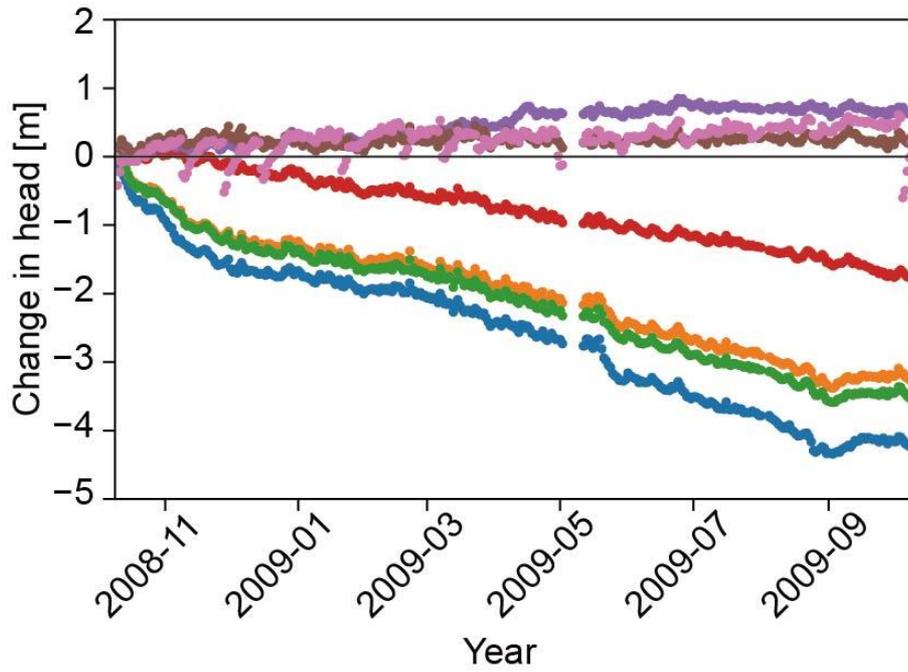
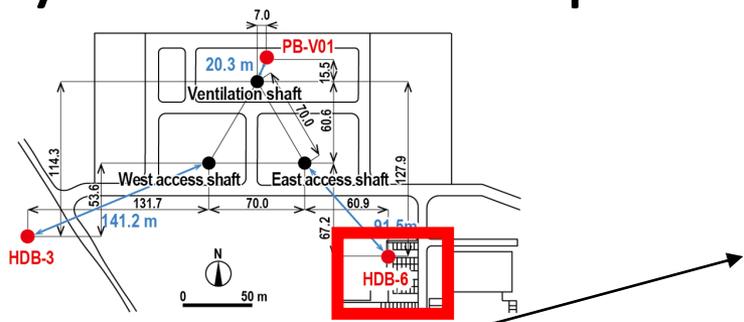
| No. | Monitoring section (Below ground level, m) | Geology |
|-----|--|-------------|
| 1 | 90.19–100.04 | Koetoi Fm. |
| 2 | 185.36–195.21 | Koetoi Fm. |
| 3 | 196.11–258.53 | Koetoi Fm. |
| 4 | 326.39–336.21 | Koetoi Fm. |
| 5 | 397.54–426.84 | Koetoi Fm. |
| 6 | 435.23–487.28 | Wkkanai Fm. |
| 7 | 488.18–498.00 | Wkkanai Fm. |

HDB-6

| No. | Monitoring section (Below ground level, m) | Geology | Geological feature |
|-----|--|-------------|--------------------|
| 1 | 60.57–70.41 | Koetoi Fm. | |
| 2 | 71.31–24.74 | Koetoi Fm. | |
| 3 | 225.64–287.76 | Koetoi Fm. | |
| 4 | 291.00–301.00 | Wkkanai Fm. | Fault |
| 5 | 303.80–361.94 | Wkkanai Fm. | |
| 6 | 364.00–374.00 | Wkkanai Fm. | Fault |
| 7 | 389.00–394.00 | Wkkanai Fm. | Fault |
| 8 | 443.50–450.50 | Wkkanai Fm. | Fault |
| 9 | 509.00–514.00 | Wkkanai Fm. | No Fault |
| 10 | 562.50–567.50 | Wkkanai Fm. | Fault |
| 11 | 587.50–592.50 | Wkkanai Fm. | No Fault |

HDB-6における水圧応答

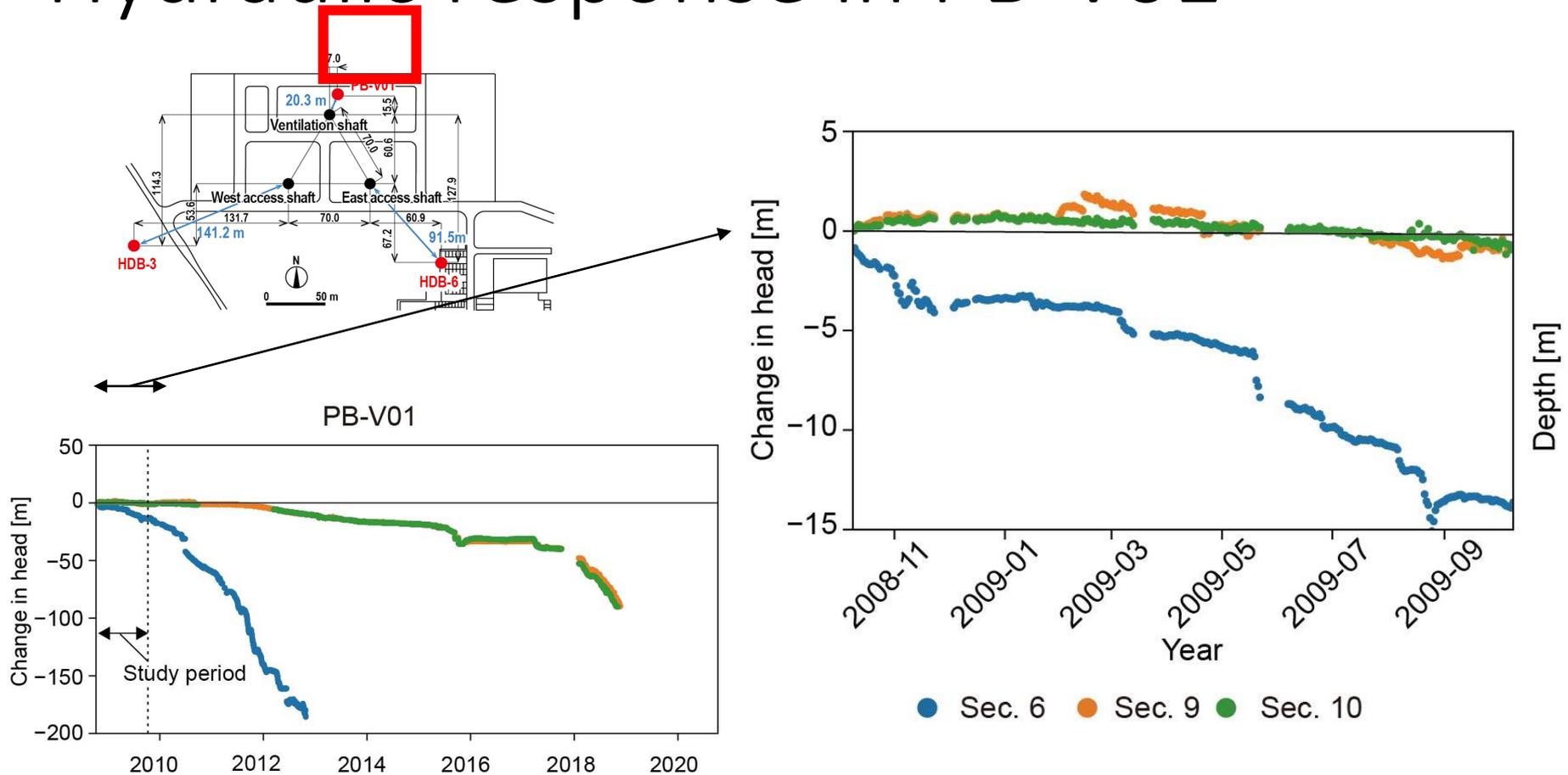
Hydraulic response in HDB-6



- 509mより浅い位置にあるボーリング孔では水圧が低下
- 509mより深い位置にあるボーリング孔では水圧が上昇

PB-V01における水圧応答

Hydraulic response in PB-V01



- 461.01mより浅い位置にあるボーリング孔では水圧が低下
- 461.01mより深い位置にあるボーリング孔では水圧が一時的に上昇

数値解析 Numerical simulation

- ビオ理論に基づく水理力学連成解析

幌延のような軟岩においては水理力学連成動が顕著な可能性

基礎方程式

$$-\nabla \cdot \sigma = f + \rho g$$

つり合い式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{k}{\rho g} \nabla^2 p = s$$

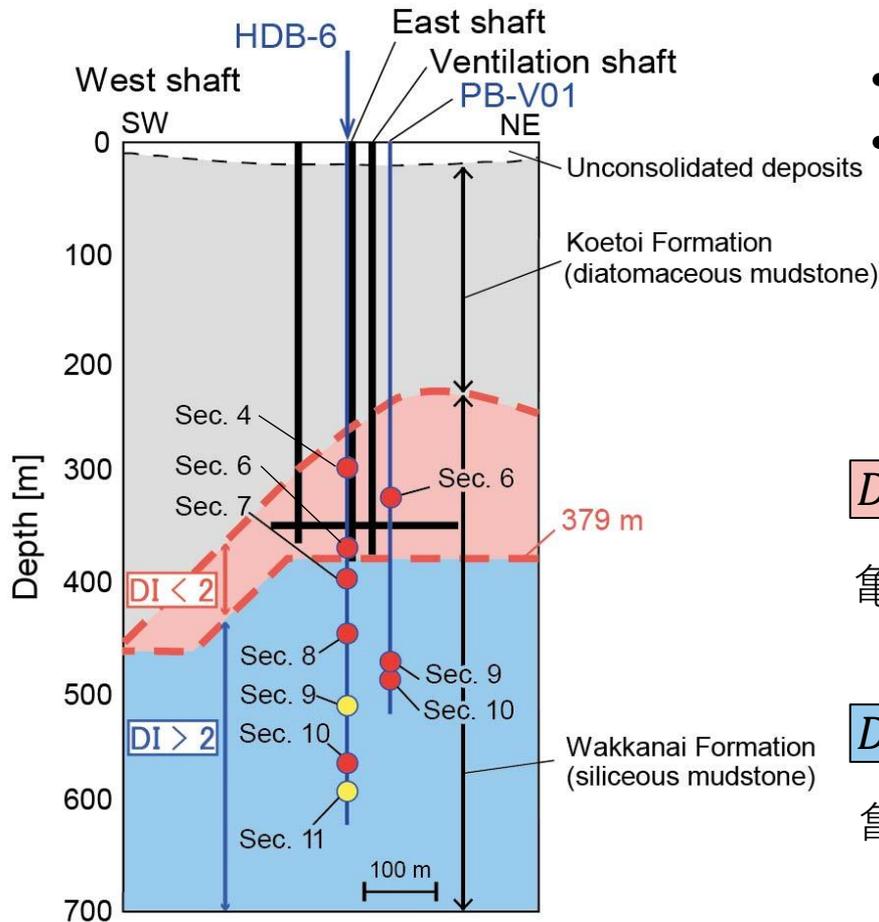
地下水の質量保存則

$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_v \\ \Delta \zeta \end{pmatrix} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} 1 & -\alpha \\ -\alpha & \alpha/B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \sigma_m \\ \Delta p \end{pmatrix}$$

応力・水圧と体積ひずみおよび
間隙流体の体積の線形関係

FLAC3D 5.01を用いて解析を実施

概念モデル Conceptual Model



- 稚内層の透水性に着目した解析
- 稚内層内の透水構造をダクタリティインデックス(DI)により分割

$$DI = \frac{\sigma'_m}{\sigma_t} \quad \sigma'_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \alpha p$$

$DI < 2$

亀裂や断層の連結性が高く、透水性が高い

$DI > 2$

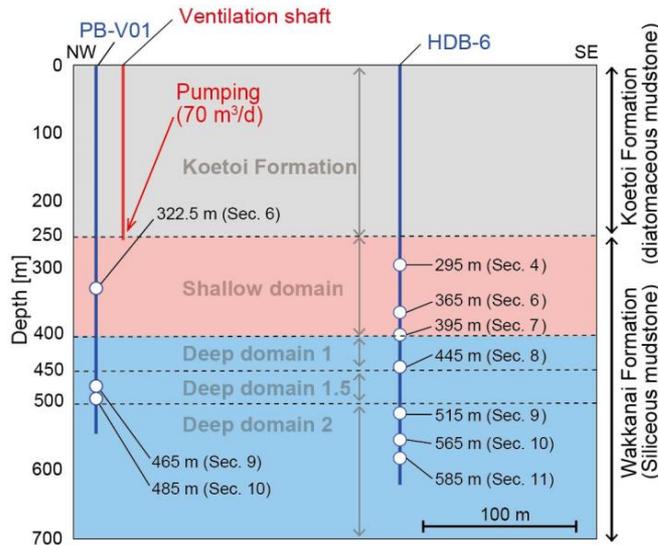
亀裂や断層の連結性が乏しく、透水性が低い

- Fault intersection
- No fault intersection

Ishii, 2015

解析モデル

Simulation results



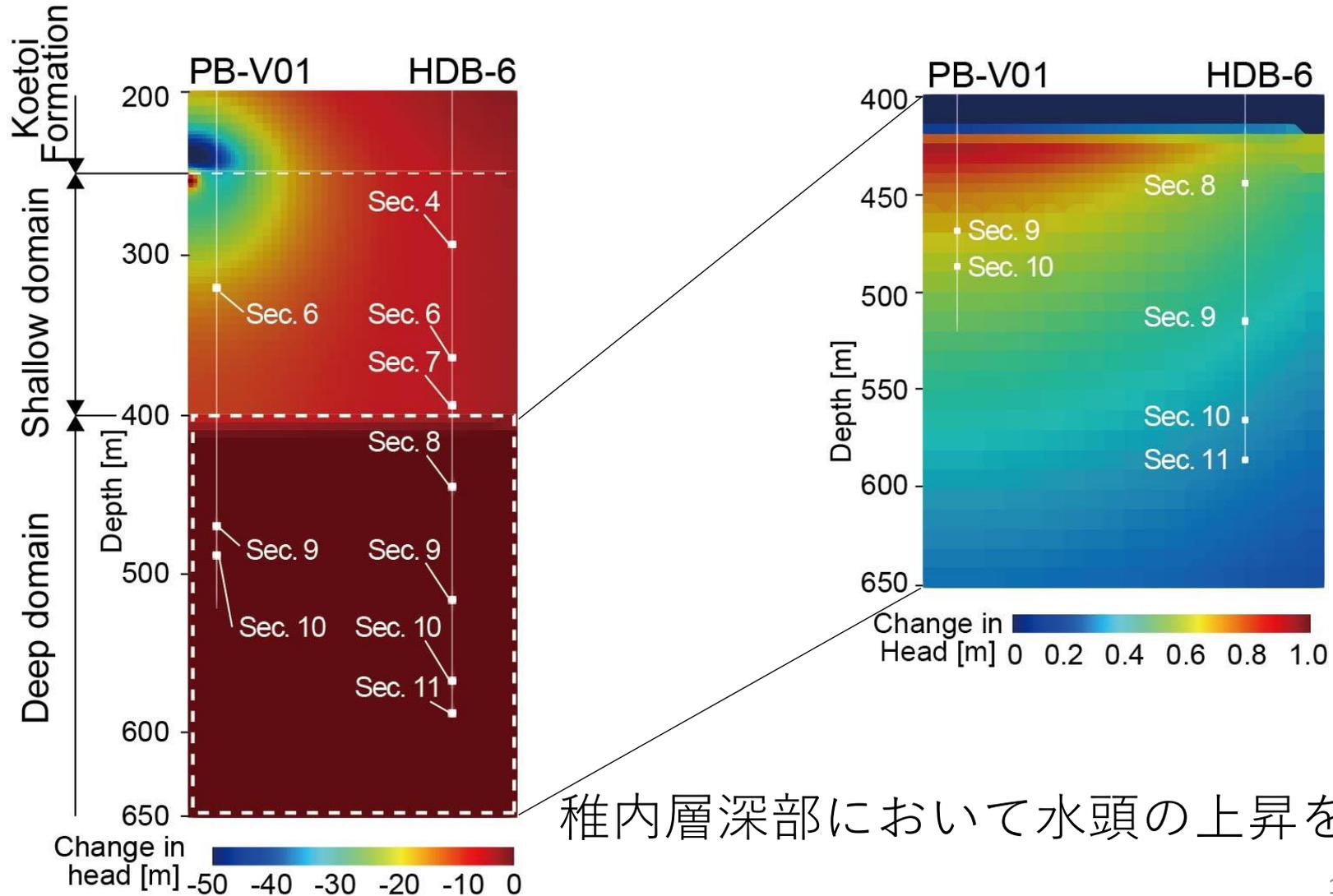
- 力学特性および水理力学連成挙動に関する物性値は、室内試験により取得された値を参考に設定
- 声問層および稚内層浅部の透水性は、パッカー試験により取得された値を参考に設定
- 稚内層深部の透水性は健岩部の値を参考に設定

基本モデルのパラメータ

| | G [GPa] | K [GPa] | α | B | ϕ | k [m/s] | S_s [1/m] |
|-------------------------|---------|---------|----------|------|--------|-----------------------|----------------------|
| Koetoi Formation | 0.24 | 0.55 | 1.0 | 0.87 | 60 | 5.0×10^{-9} | 1.4×10^{-5} |
| Shallow domain | 1.95 | 1.62 | 0.93 | 0.79 | 40 | 2.0×10^{-8} | 3.5×10^{-6} |
| Deep domain 1 | 1.95 | 1.62 | 0.93 | 0.79 | 40 | 1.0×10^{-11} | 3.5×10^{-6} |
| Deep domain 1.5 | 1.95 | 1.62 | 0.93 | 0.79 | 40 | 1.0×10^{-11} | 3.5×10^{-6} |
| Deep domain 2 | 1.95 | 1.62 | 0.93 | 0.79 | 40 | 1.0×10^{-11} | 3.5×10^{-6} |

解析結果 (水頭分布) Simulation results (hydraulic head)

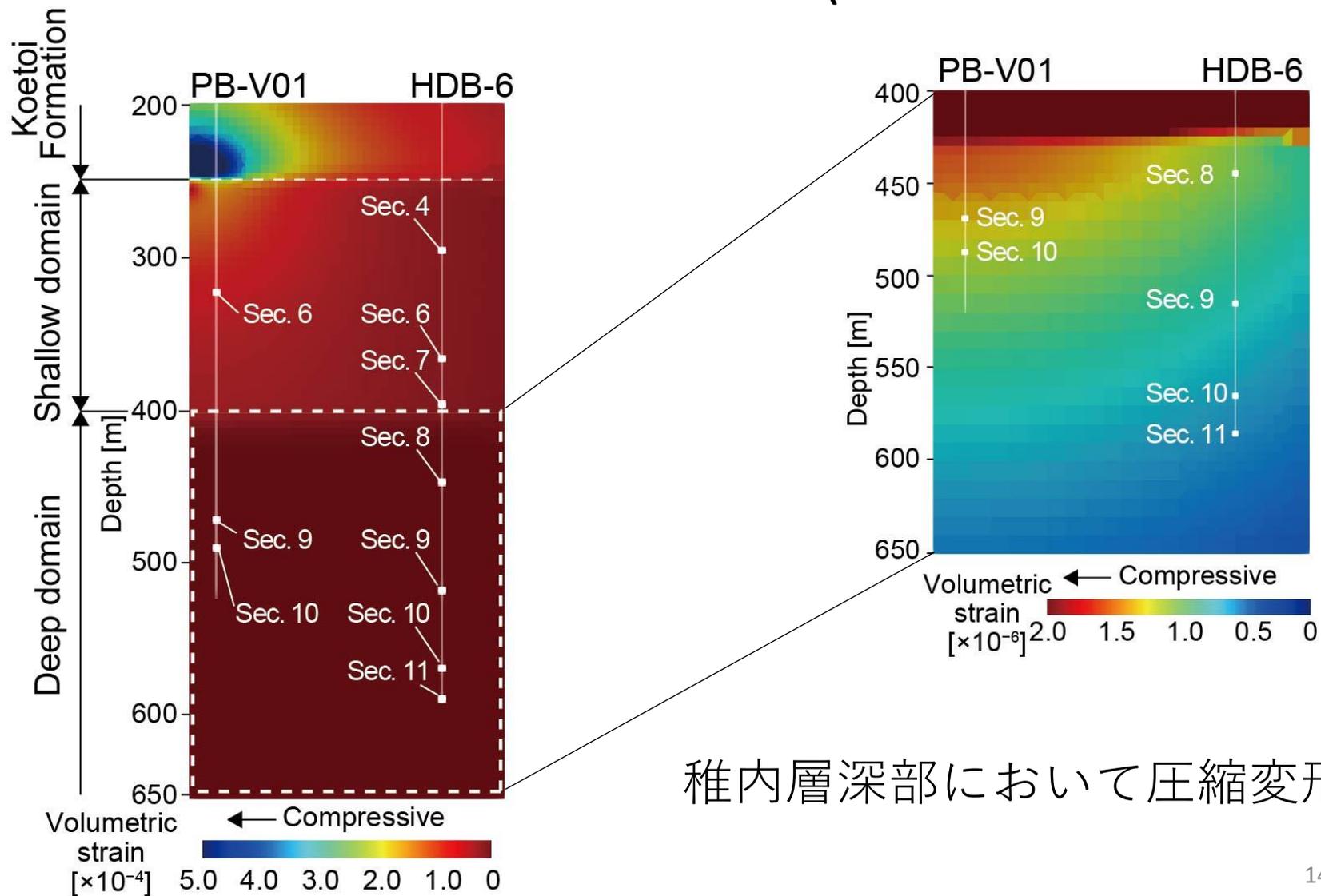
1年後の解析結果



稚内層深部において水頭の上昇を再現

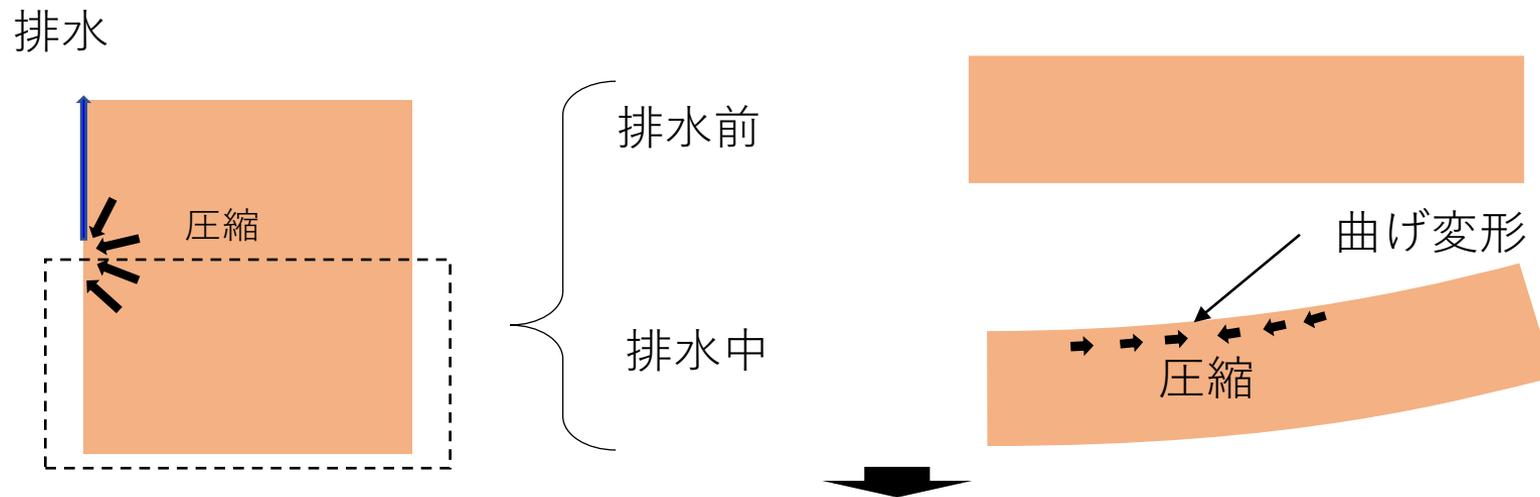
解析結果(体積ひずみ) Simulation results (Volumetric strain)

1年後の解析結果

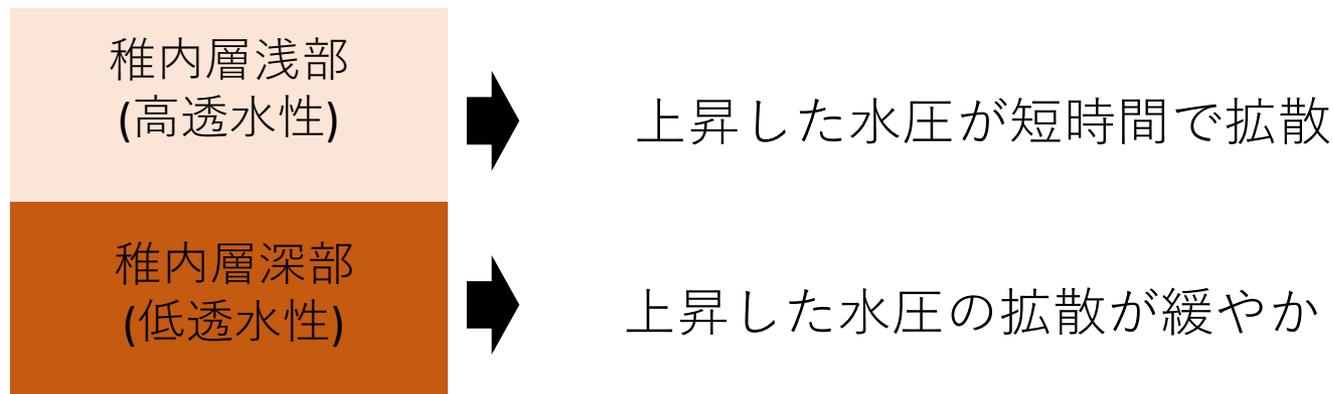


稚内層深部において圧縮変形

稚内深部における水頭上昇 Mechanism of pressure raise



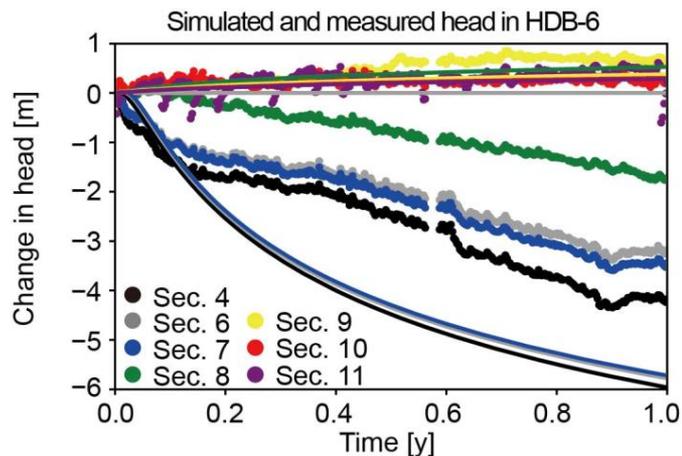
- 圧縮変形により間隙水圧が上昇



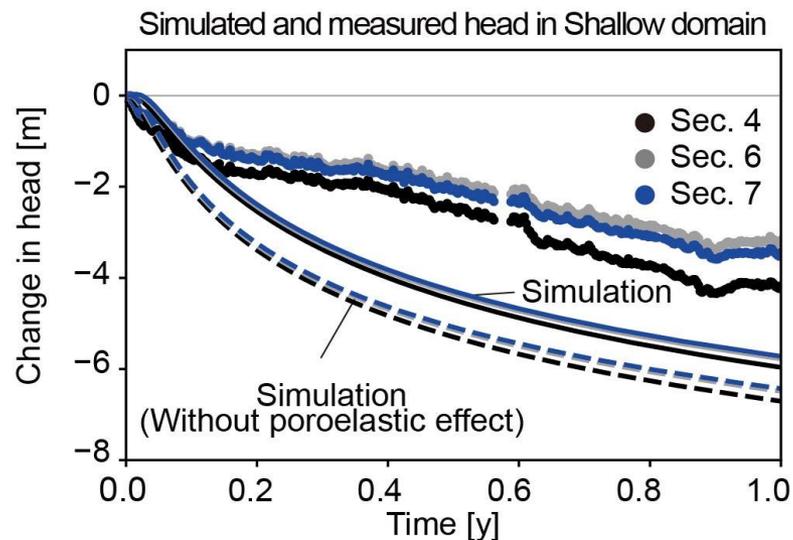
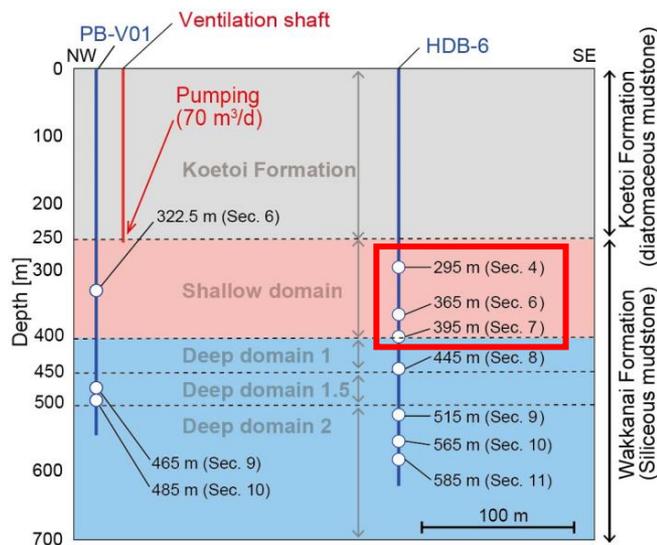
排水条件下における稚内層深部での水圧上昇はMandel Cryer効果で説明できる

解析結果と観測値の比較

Comparison of measured data and simulated results

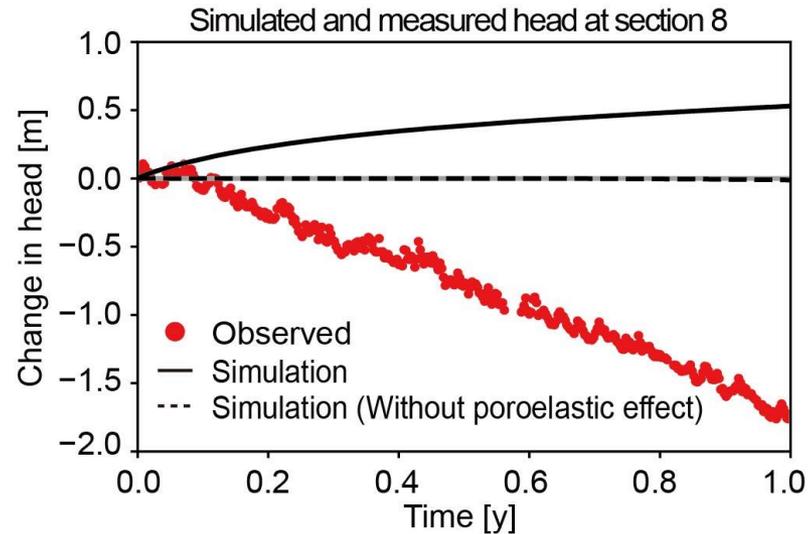
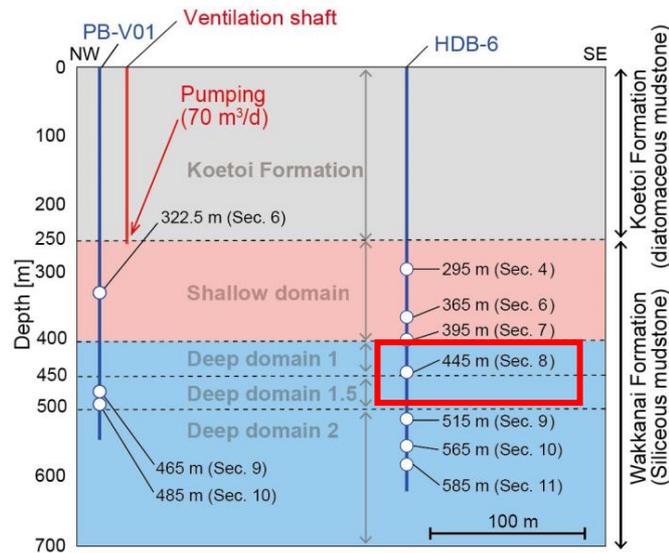


- 解析結果では稚内層浅部分では水頭が減少
- 稚内層深部で水頭の上昇を再現
- 稚内層浅部において、水理力学連成挙動は水頭の減少を抑制



解析結果と観測値の比較

Comparison of measured data and simulated results



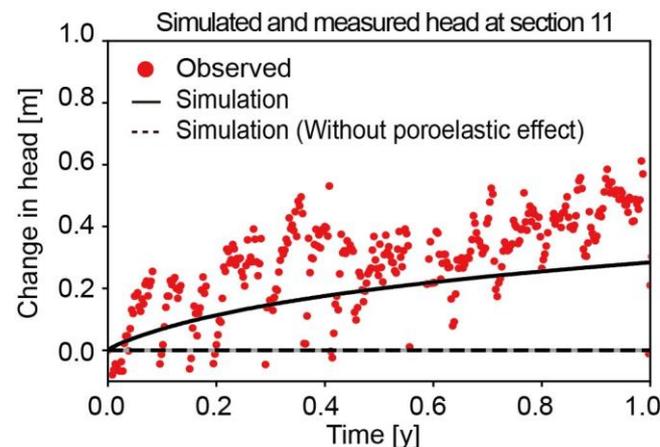
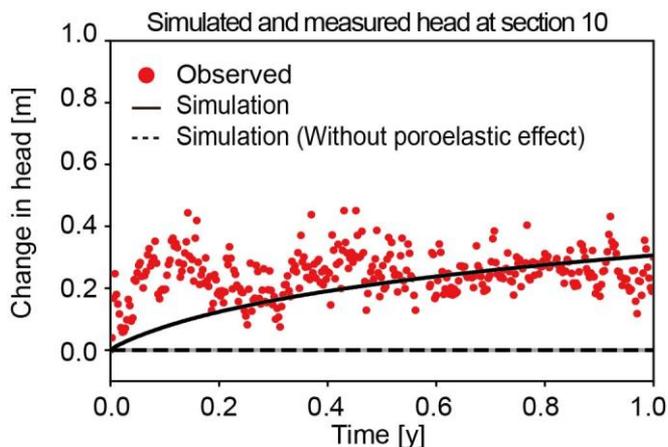
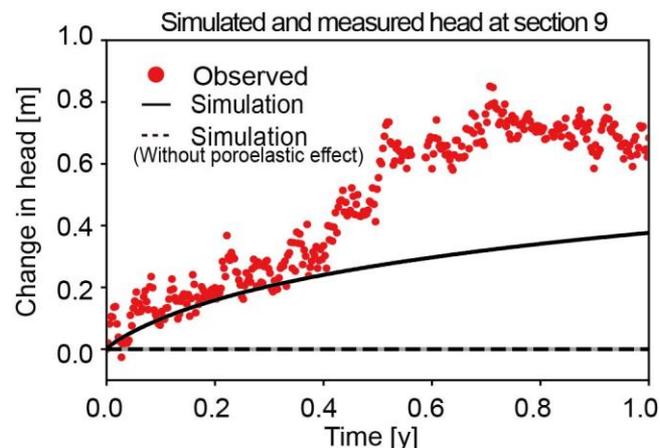
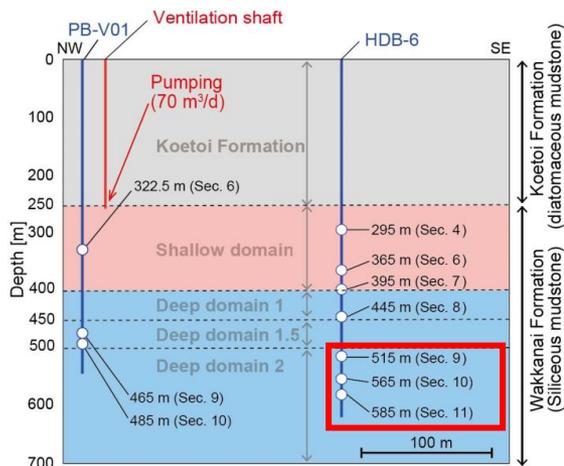
- 水理力学連成挙動を考慮しない場合、水頭に変化が見られない
- 水理力学連成挙動を考慮した場合、水頭が上昇



深度450m付近では基本モデルで設定した透水性よりも高い可能性

解析結果と観測値の比較

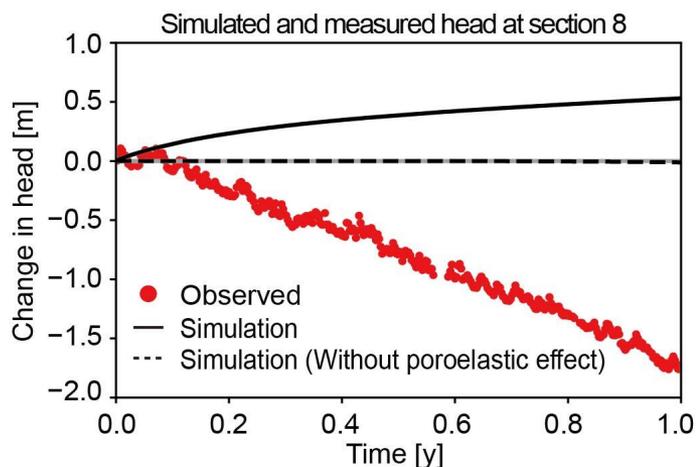
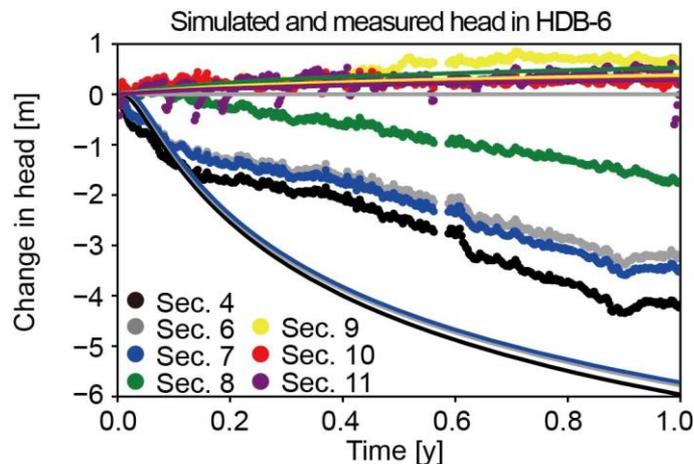
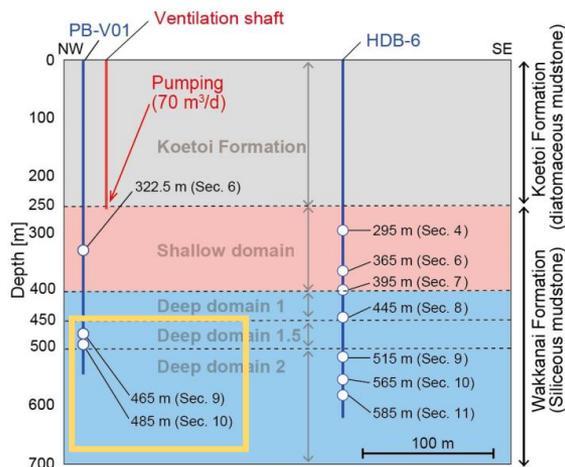
Comparison of measured data and simulated results



稚内層深部における水頭変化は再現

HDB-6における比較に関する考察

Question come from the comparisons



解析結果はDIの値が2付近である区間8を除いて概ね観測値を再現

- DIが2付近において透水性がどのように変化するのか評価

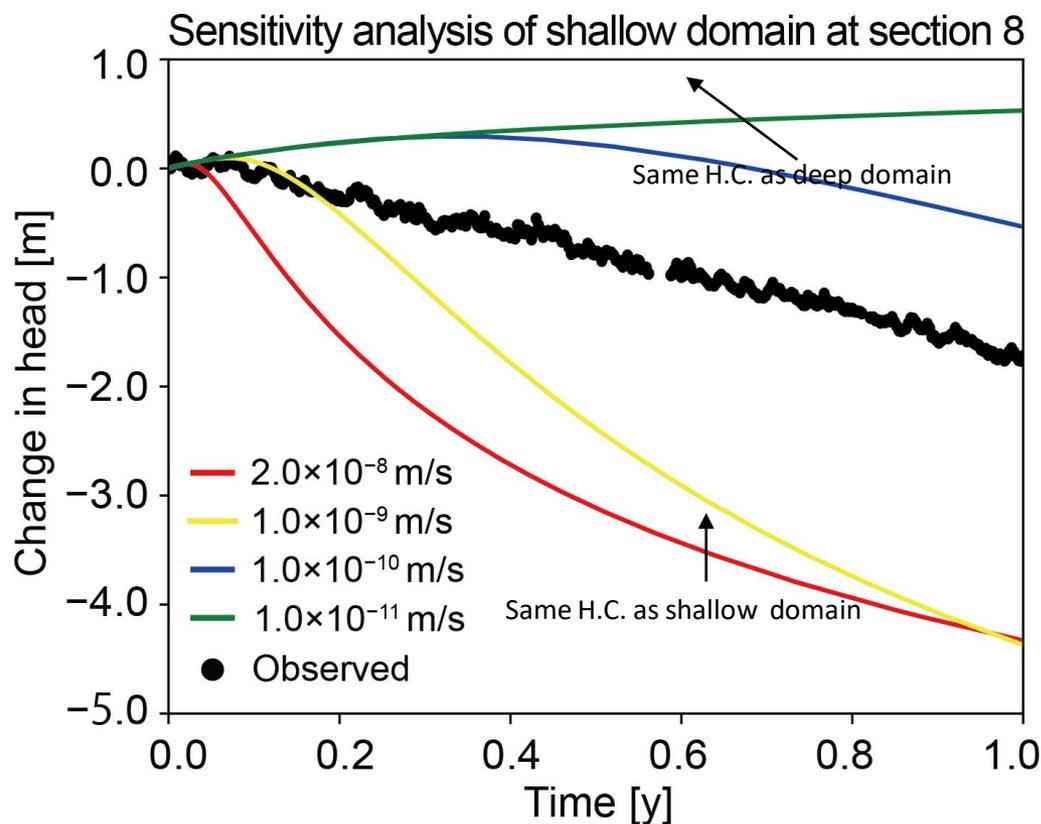
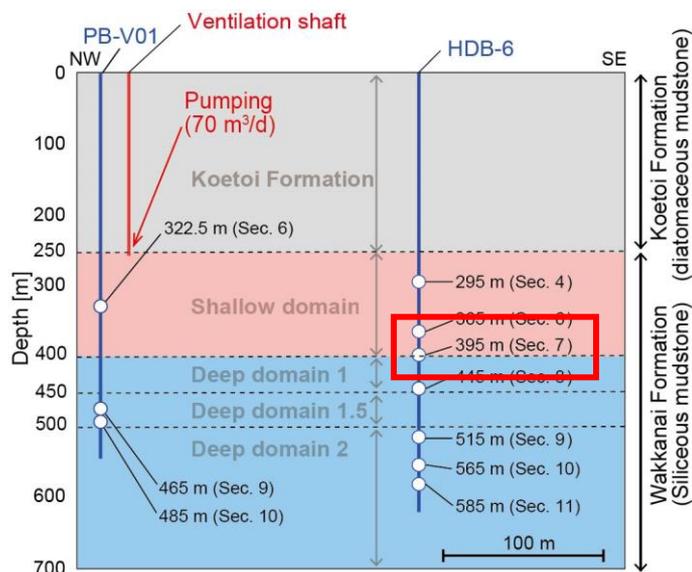


- PB-V01における比較による検討
- 感度解析による検討

HDB-6における水圧応答の感度解析

Parametric study around the boundary between shallow and deep domain

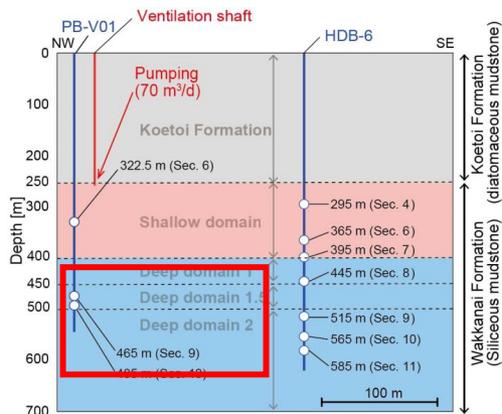
- 透水性（断層の連結性）が地下深くなるにつれて徐々に低下するという仮定の下、区間8が位置する深度の透水性を評価



- 区間8が位置する深度における透水性は、稚内層浅部と深部の間の値をとりうる

PV-B01における比較

Comparison of results in PV-B01



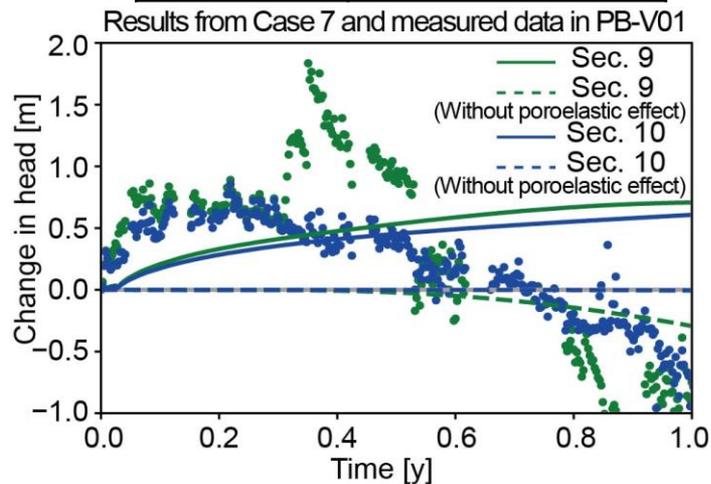
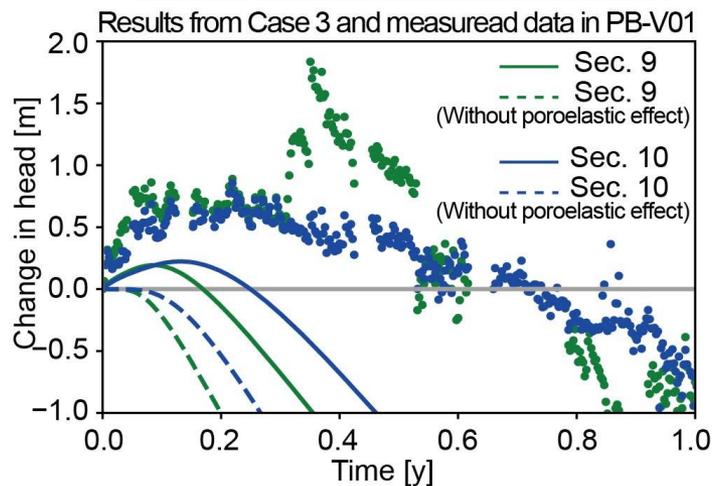
HDB-6における比較による推定

| | Effective hydraulic conductivity [m/s] |
|----------------|--|
| Shallow domain | $\approx 2.0 \times 10^{-8}$ |
| Deep domain 1 | $1.0 \times 10^{-10} - 1.0 \times 10^{-9}$ |
| Deep domain 2 | 1.0×10^{-11} |

稚内層浅部と深部の間の領域をさらに分割

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Deep domain 1 | 1.0×10^{-9} |
| Deep domain 1.5 | 1.0×10^{-9} |
| Deep domain 2 | 1.0×10^{-11} |

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Deep domain 1 | 1.0×10^{-9} |
| Deep domain 1.5 | 1.0×10^{-11} |
| Deep domain 2 | 1.0×10^{-11} |



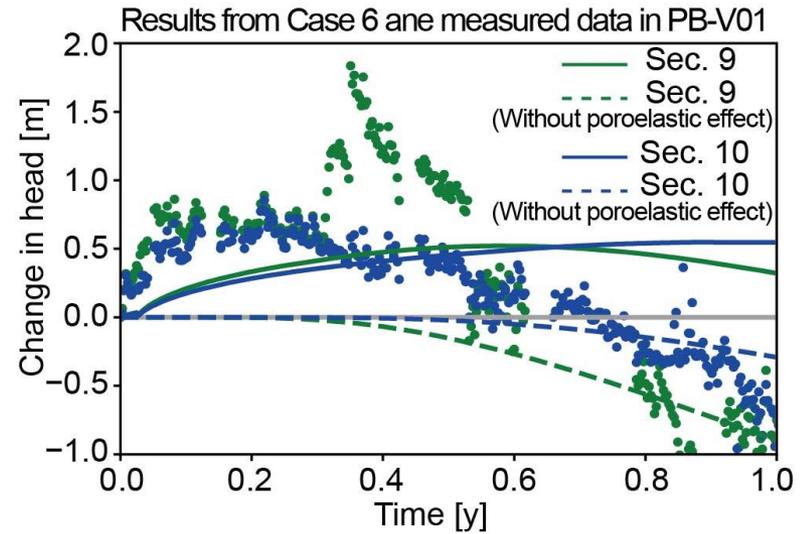
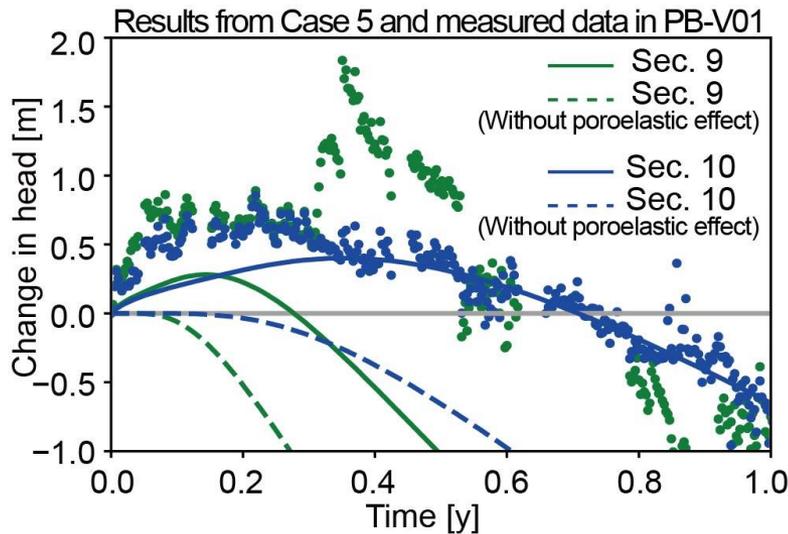
PV-B01による比較からも、稚内層深部において透水性（断層の連結性）が徐々に低下する様子が示唆される

PV-B01における比較

Comparison of results in PV-B01

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Deep domain 1 | 1.0×10^{-9} |
| Deep domain 1.5 | 1.0×10^{-10} |
| Deep domain 2 | 1.0×10^{-11} |

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Deep domain 1 | 1.0×10^{-10} |
| Deep domain 1.5 | 1.0×10^{-10} |
| Deep domain 2 | 1.0×10^{-10} |



PV-B01による比較からも、稚内層深部において透水性（断層の連結性）が徐々に低下する様子が示唆され、以下のように推定される

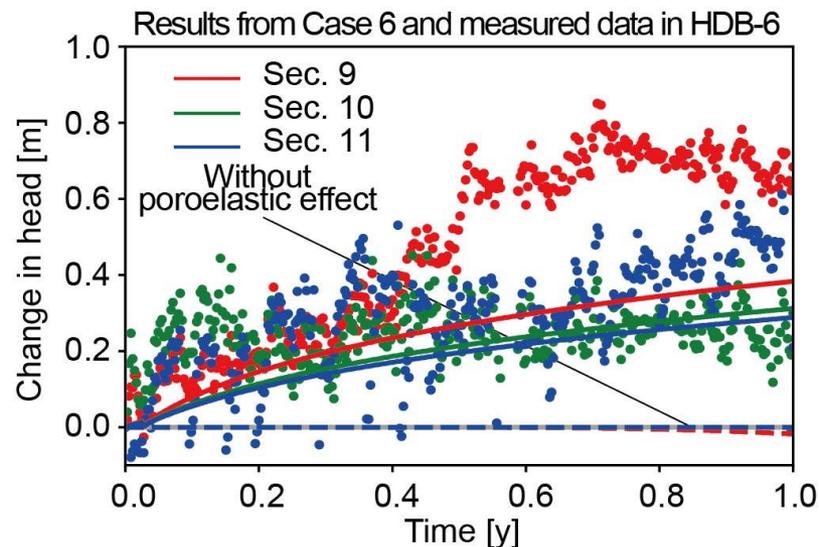
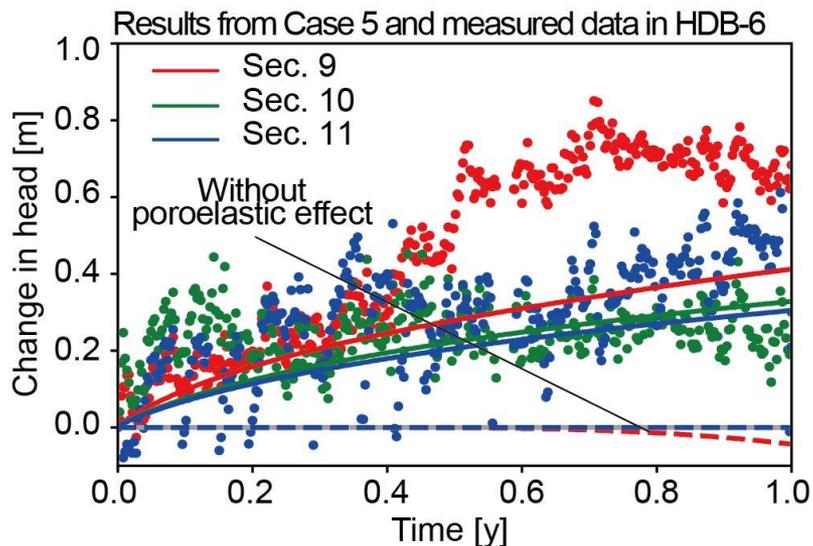
| | Effective H.C. | Fault hydraulic connectivity |
|-----------------|---|------------------------------|
| Shallow domain | $\approx 2.0 \times 10^{-8}$ | High |
| Deep domain 1 | $1.0 \times 10^{-10} - 1.0 \times 10^{-9}$ | Intermediate |
| Deep domain 1.5 | $\approx 1.0 \times 10^{-10}$ | Intermediate |
| Deep domain 2 | $1.0 \times 10^{-11} - 1.0 \times 10^{-10}$ | Low |

HDB-6における推定結果の検証

Confirmation of data in HDB-6

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Deep domain 1 | 1.0×10^{-9} |
| Deep domain 1.5 | 1.0×10^{-10} |
| Deep domain 2 | 1.0×10^{-11} |

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Deep domain 1 | 1.0×10^{-10} |
| Deep domain 1.5 | 1.0×10^{-10} |
| Deep domain 2 | 1.0×10^{-10} |



HDB-6およびPB-V01の水圧応答から、稚内層のDIの値が2付近の領域において、透水性（断層の亀裂の連結性）が徐々に低下する様子が示唆された

力学特性の設定および感度解析

Effect of mechanical properties on hydraulic response

- 水理力学連成挙動を考慮する場合、透水性に加えて力学的な物性値も設定する必要
- 健岩部相当の物性値を入力し立坑掘削時の水圧応答を再現
- 健岩部相当の物性値から計算される比貯留係数は、
原位置で観測された値と調和的



- 今回の再現解析を実施したような施設スケールの解析においては、
亀裂の連結性によらず健岩部相当の物性値を用いて解析できる可能性

力学特性が水圧応答に与える影響を検証

感度解析の条件

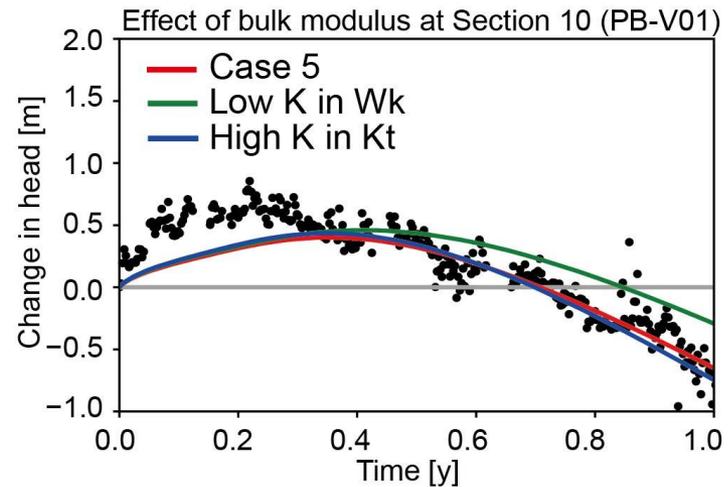
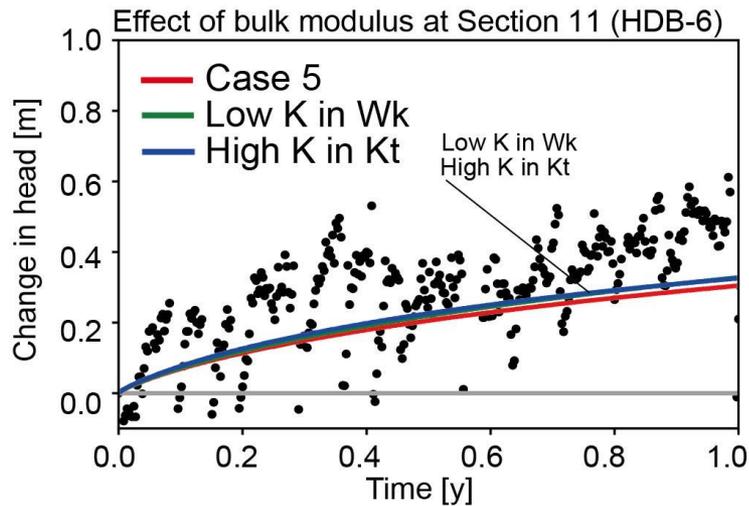
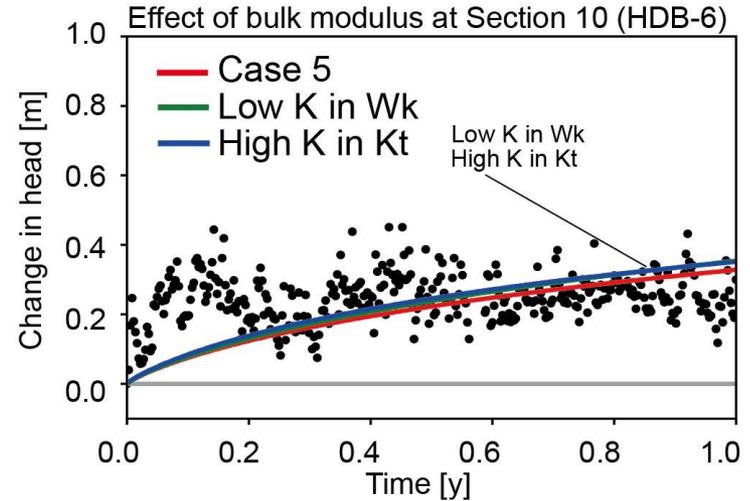
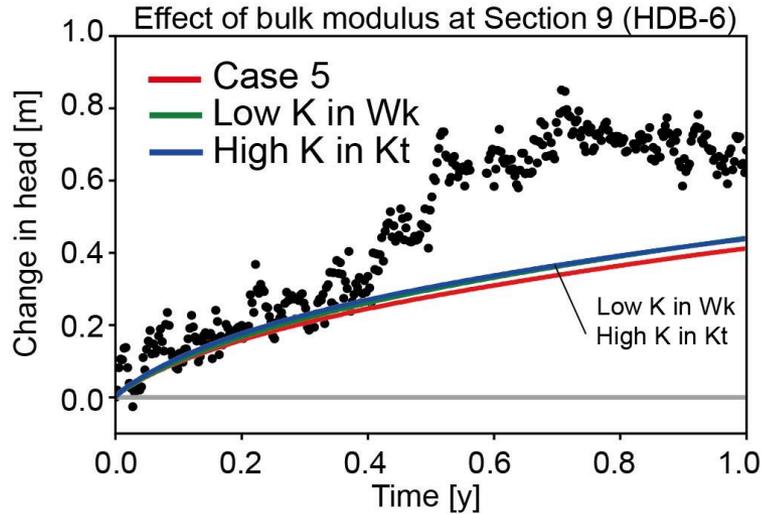
1. 稚内層は声問層よりも硬い（地下深部は地下浅部よりも硬い）
2. ポアソン比は正



体積弾性率および剛性率を制約

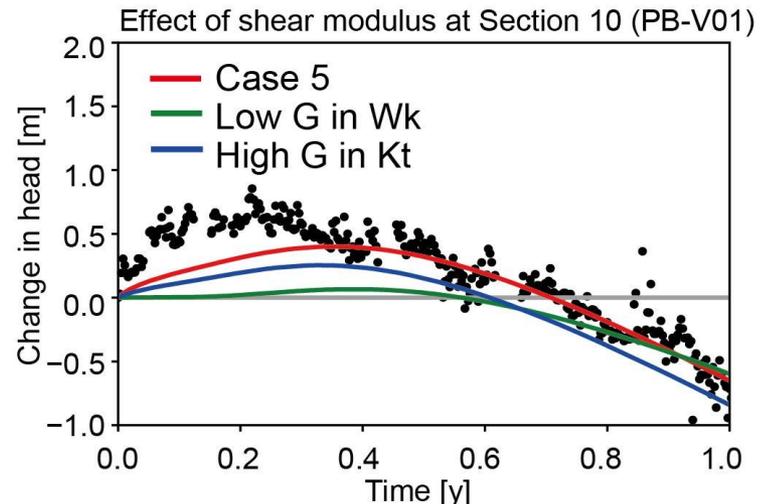
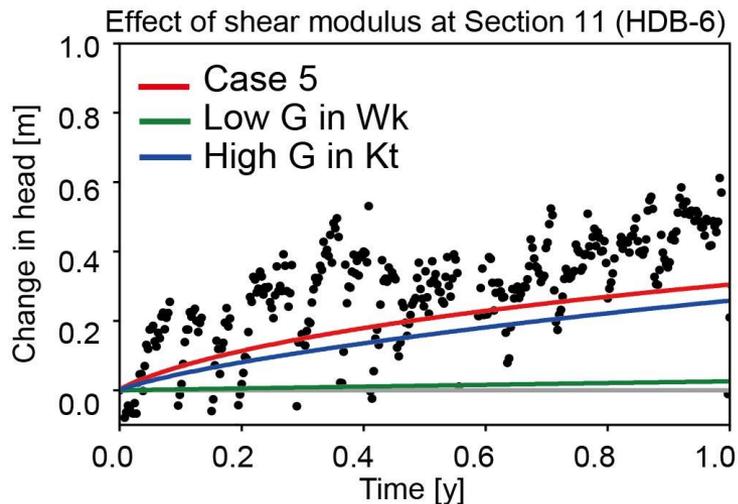
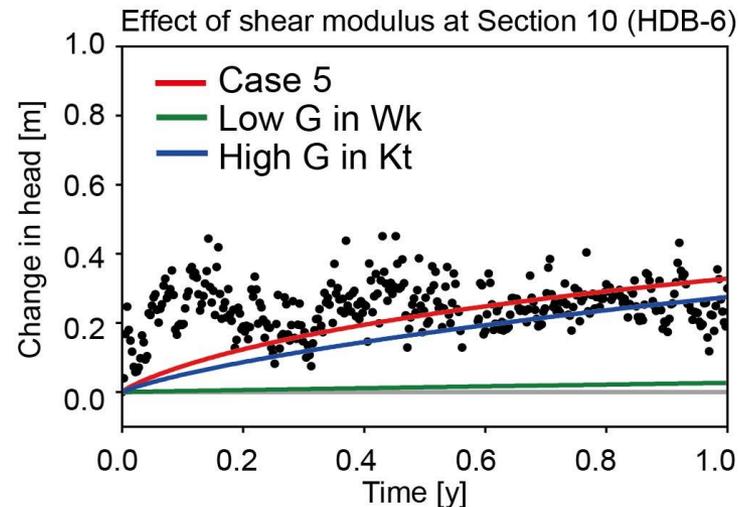
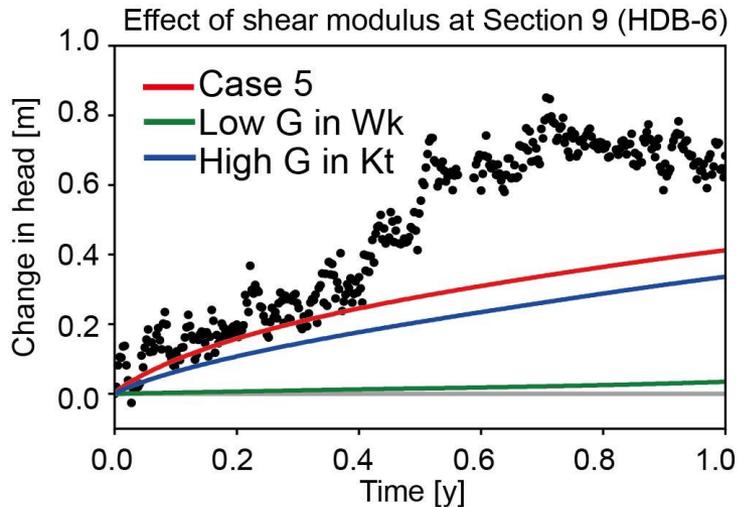
感度解析 (体積弾性率)

Sensitivity analysis of bulk modulus



感度解析（剛性率）

Sensitivity analysis of shear modulus



稚内層浅部と深部の剛性率の差が、稚内層深部における水圧上昇の程度に寄与

結論

Conclusion

- 水理力学連成解析により立坑掘削時の水圧応答の再現解析を実施
- 稚内層深部において排水条件下で観測された水圧上昇は水理力学連成挙動 (Mandel-Cryer effect) により再現
- 感度解析により、透水性（断層の連結性）は地下深部において徐々に低下する

パラメータ設定

Parameter Setting

体積弾性率の感度解析

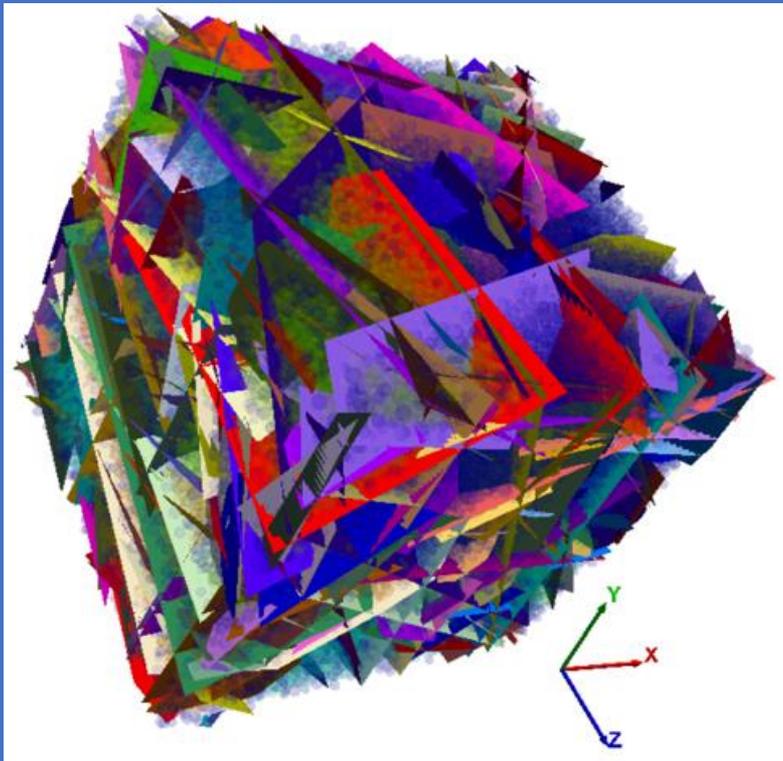
| | Koetoi Fm. | | | Wakkanai Fm. | | |
|-----------------|------------|---------|----------|--------------|---------|----------|
| | G [GPa] | K [GPa] | γ | G [GPa] | K [GPa] | γ |
| Reference model | 0.24 | 0.55 | 0.31 | 1.95 | 1.62 | 0.07 |
| Low K in Wk | 0.24 | 0.55 | 0.31 | 1.95 | 1.35 | 0.01 |
| High K in Kt | 0.24 | 1.62 | 0.07 | 1.95 | 1.62 | 0.01 |

剛性率の感度解析

| | Koetoi Fm. | | | Wakkanai Fm. | | |
|-----------------|------------|---------|----------|--------------|---------|----------|
| | G [GPa] | K [GPa] | γ | G [GPa] | K [GPa] | γ |
| Reference model | 0.24 | 0.55 | 0.31 | 1.95 | 1.62 | 0.07 |
| Low K in Wk | 0.24 | 0.55 | 0.31 | 0.24 | 1.62 | 0.43 |
| High K in Kt | 0.80 | 0.55 | 0.01 | 1.95 | 1.62 | 0.07 |

亀裂性媒体の地下水流動・核種移行解析における 不確実性

Uncertainty in flow and mass transport model of fractured rock



Fracture Flow Solutions

内田 雅大

Masahiro UCHIDA

2022年5月17日

土木学会シンポジウム

内容

Contents

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性
Connectivity of fractures
- チャンネリング
Channeling
 - ① マトリクス拡散寄与面積
Flow wetted surface
 - ② マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth
- まとめ
Summary

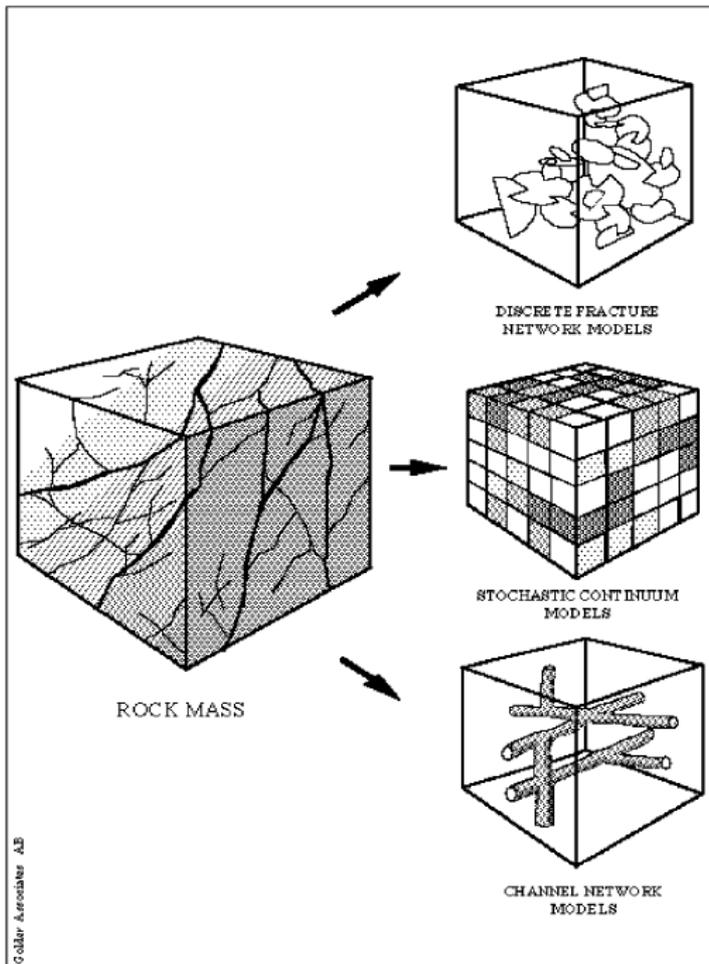
内容

Contents

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性
Connectivity of fractures
- チャンネリング
Channeling
 - ① マトリクス拡散寄与面積
Flow wetted surface
 - ② マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth
- まとめ
Summary

亀裂性岩盤中の水理・物質移行解析に 使用されるモデル

Models used for flow and mass transport simulation of fractured rock



- 亀裂ネットワークモデル
(DFN: Discrete Fracture Network Model)

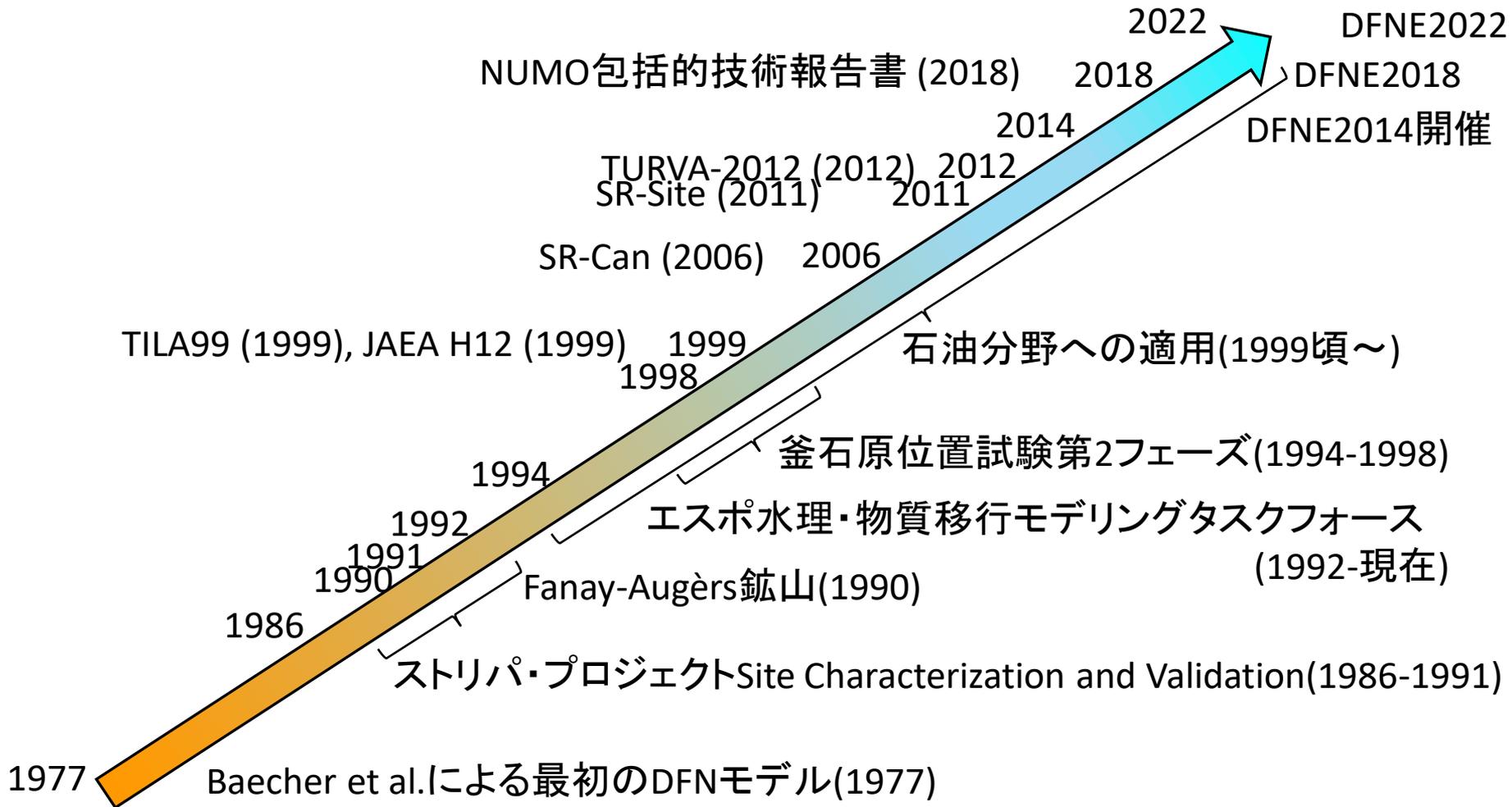
- 等価多孔質媒体モデル
(EQPM: Equivalent Porous Media Model)

- チャンネルネットワークモデル
(CN: Channel Network Model)

ハイブリッド
モデル
Hybrid model

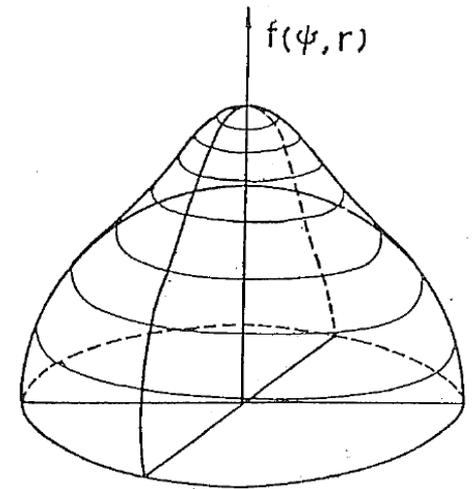
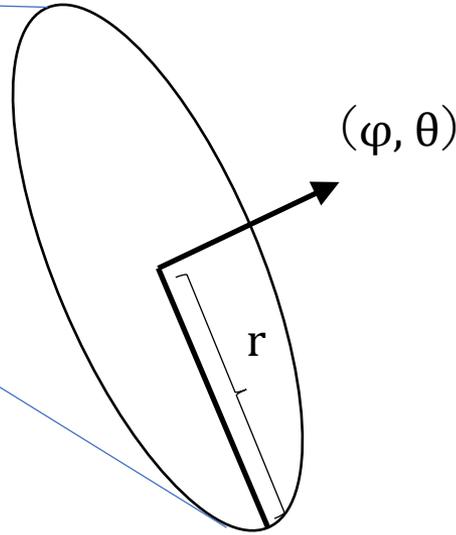
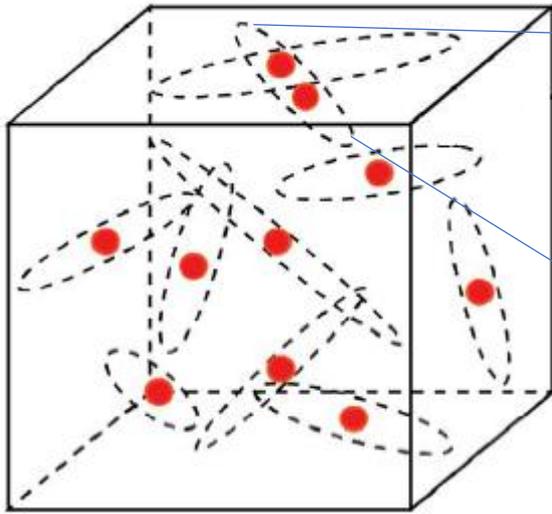
DFNの歴史

History of DFN



亀裂ネットワークモデルの作成手順

Modelling procedure of DFN



Fisher分布

- ① 亀裂中心：主にPoisson分布
Fracture center: mainly Poisson model
- ② 亀裂の方向：主にFisher分布
Fracture orientation: mainly Fisher distribution
- ③ 亀裂半径：対数正規分布、べき乗分布
Fracture radius: log normal distribution, power-law distribution
- ④ 透水量係数：対数正規分布
Transmissivity: log normal distribution



亀裂面積の合計が設定値(P_{32})になるまで確率密度関数からのサンプリングを繰り返し、亀裂を発生

Generate fractures until sum of fracture surface area reaches prescribed fracture intensity (P_{32})



リアライゼーション → 指定回数繰り返す

Realizations: generate the prescribed number of realizations

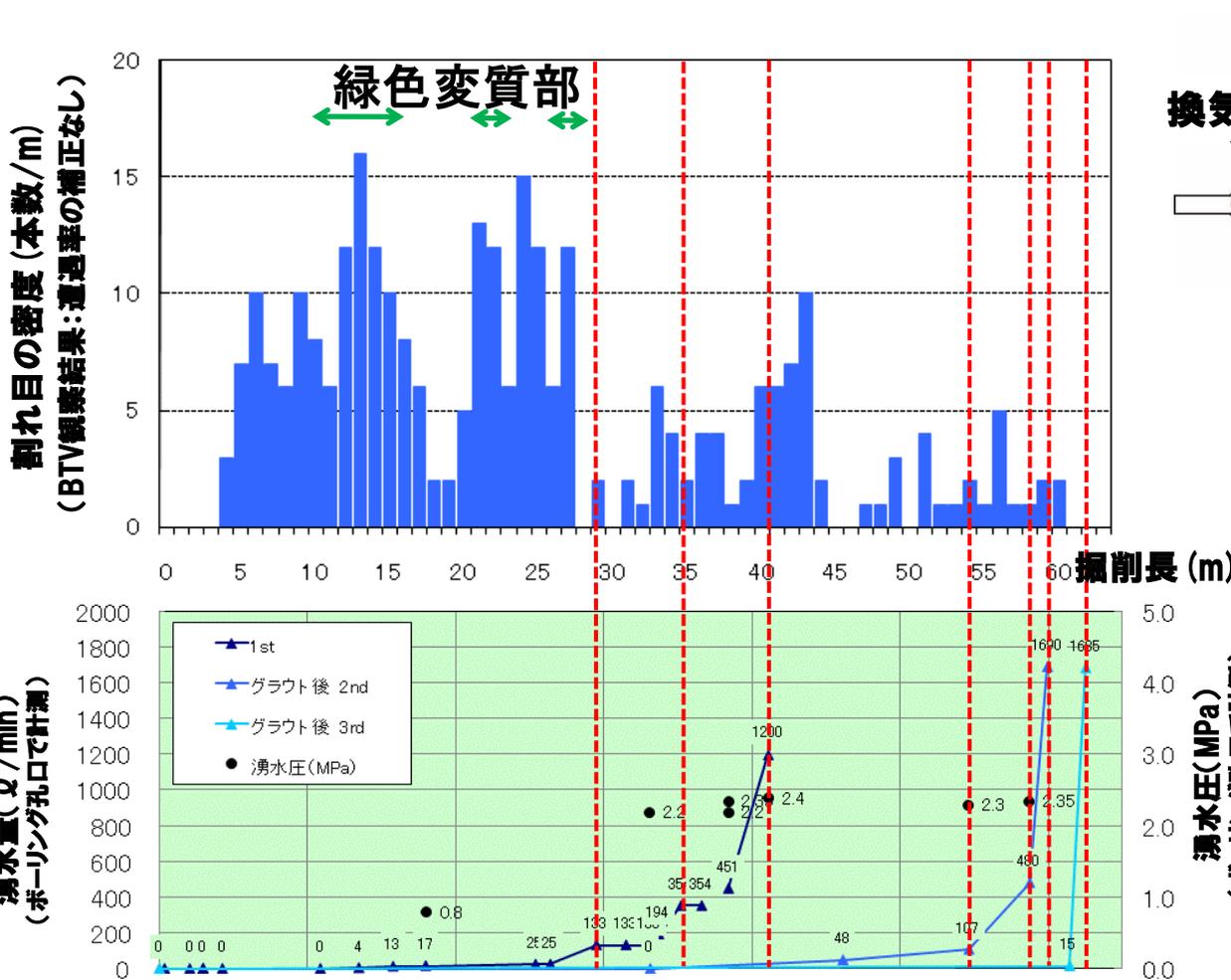
内容

Contents

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性
Connectivity of fractures
- チャンネリング
Channeling
 - ① マトリクス拡散寄与面積
Flow wetted surface
 - ② マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth
- まとめ
Summary

JAEA瑞浪の地下研での透水性亀裂

Conductive fractures in Mizunami Underground Research Laboratory

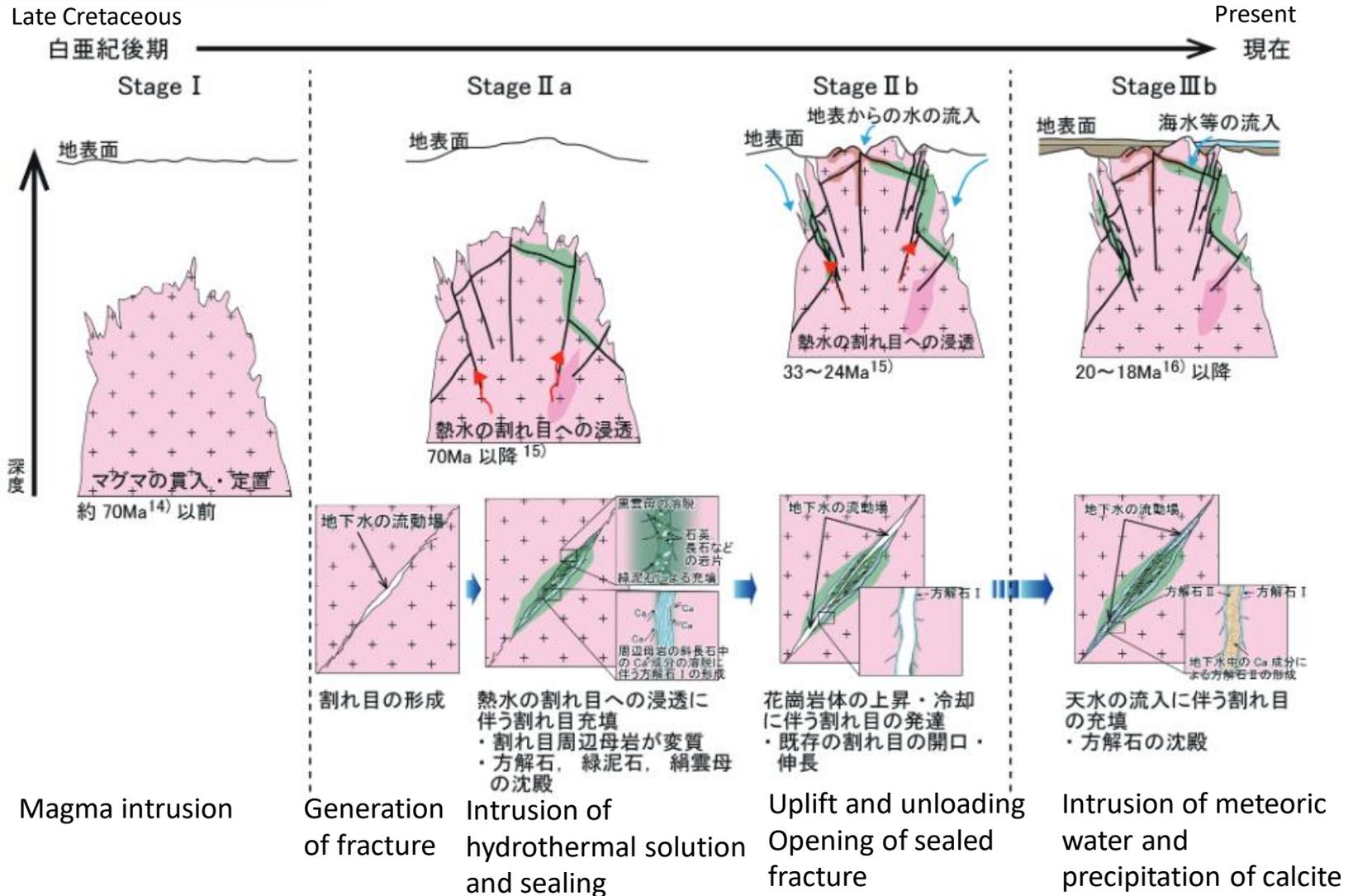


- ・非変質岩盤(28m以深)で湧水
Most outflow occurs in the unaltered granite (deeper than 28m along the borehole)
- ・主に、割れ目密度の小さい箇所で湧水が認められる。
Major outflows occur where fracture frequency is low.

先行ボーリングで観測された湧水量と亀裂頻度
Outflow and fracture frequency observed in the pilot hole

割れ目の繰り返し開口・充填のイメージ

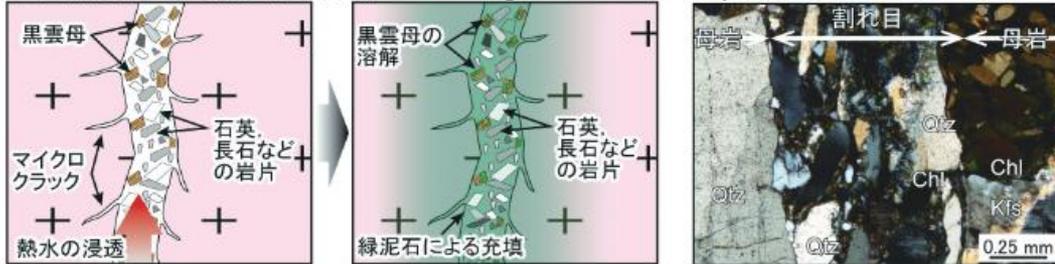
Schematic drawing of repeated opening and sealing of fractures



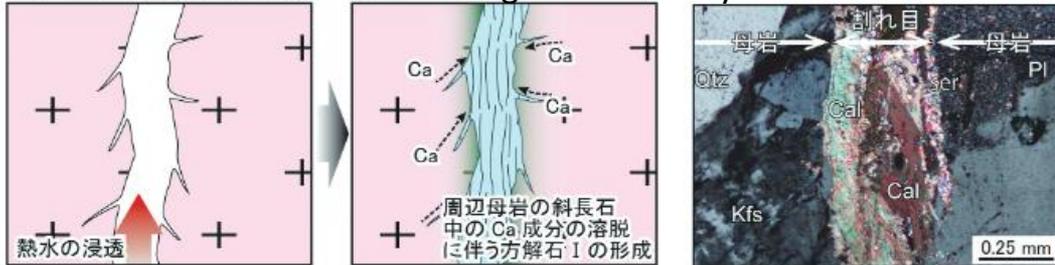
充填と開口の複数回の繰り返し

Multiple events of opening and sealing of fractures

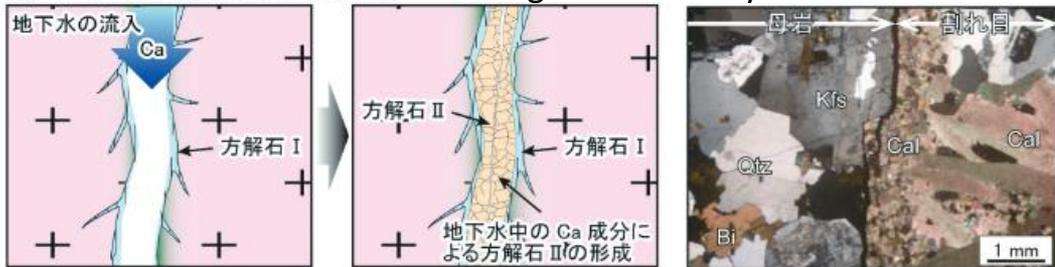
(a) 緑泥石による割れ目の充填 Sealing of fracture by chlorite



(b) 方解石 I による割れ目の充填 Sealing of fracture by calcite I



(c) 方解石 II による割れ目の充填 Sealing of fracture by calcite II



濁沸石上の方解石
Calcite formed on the laumontite

透水性亀裂と非透水性亀裂のサイズの違い

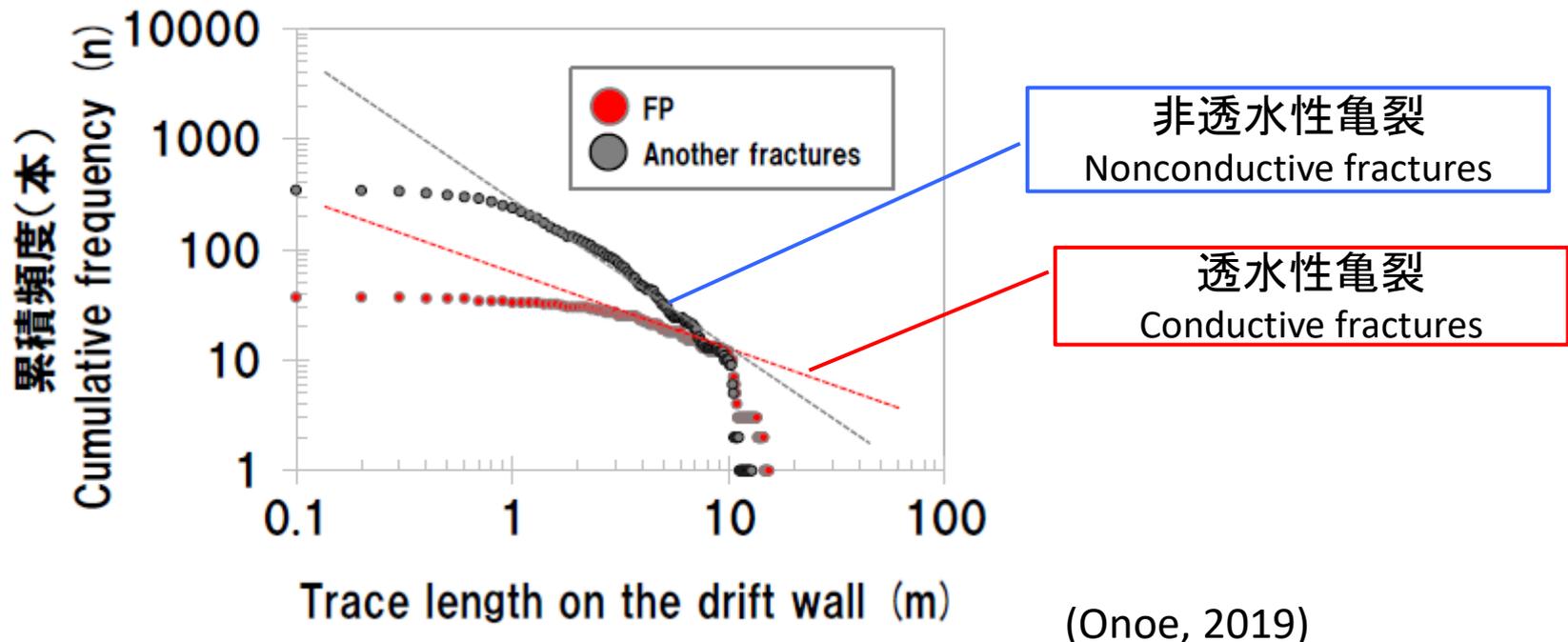
Difference in fracture size between conductive fractures and non-conductive fractures

- べき乗則は、通常全亀裂に対して定義されており、透水性亀裂を表現していない可能性がある。瑞浪では両者に違いがあることが示されている。

Power law parameters are different between nonconductive fractures and conductive fractures

✓ 大きな亀裂は連結する可能性が高く、透水性となる可能性が高い
Large fractures are more likely to be connected and likely to form flow path

✓ 小さな亀裂は連結する可能性が低く、非透水性亀裂となる可能性が高い
Small fractures are more likely to be isolated and likely to be non-conductive fractures



Geo-DFN vs Hydro-DFN

- 目的に応じたDFNの使い分けが必要
Need to model different fractures for DFN depending on the model purpose (such as geology, rock mechanics, flow, etc.)
- 地質的亀裂と透水性亀裂の不一致
Disagreement of geologic fractures and conductive fractures
 - ✓ 沈殿・充填によるシールと開口(reactivation)の繰り返し
Repeated events of sealing and opening (reactivation)
 - ✓ 現在の地下水から沈殿した自形鉱物に着目
Use of euhedral minerals precipitated from modern groundwater as a marker of conductive fractures
- 透水性亀裂の亀裂パラメータを設定する必要
Need of determining fracture parameters specific to conductive fractures

内容

Contents

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性
Connectivity of fractures
- チャンネリング
Channeling
 - ① マトリクス拡散寄与面積
Flow wetted surface
 - ② マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth
- まとめ
Summary

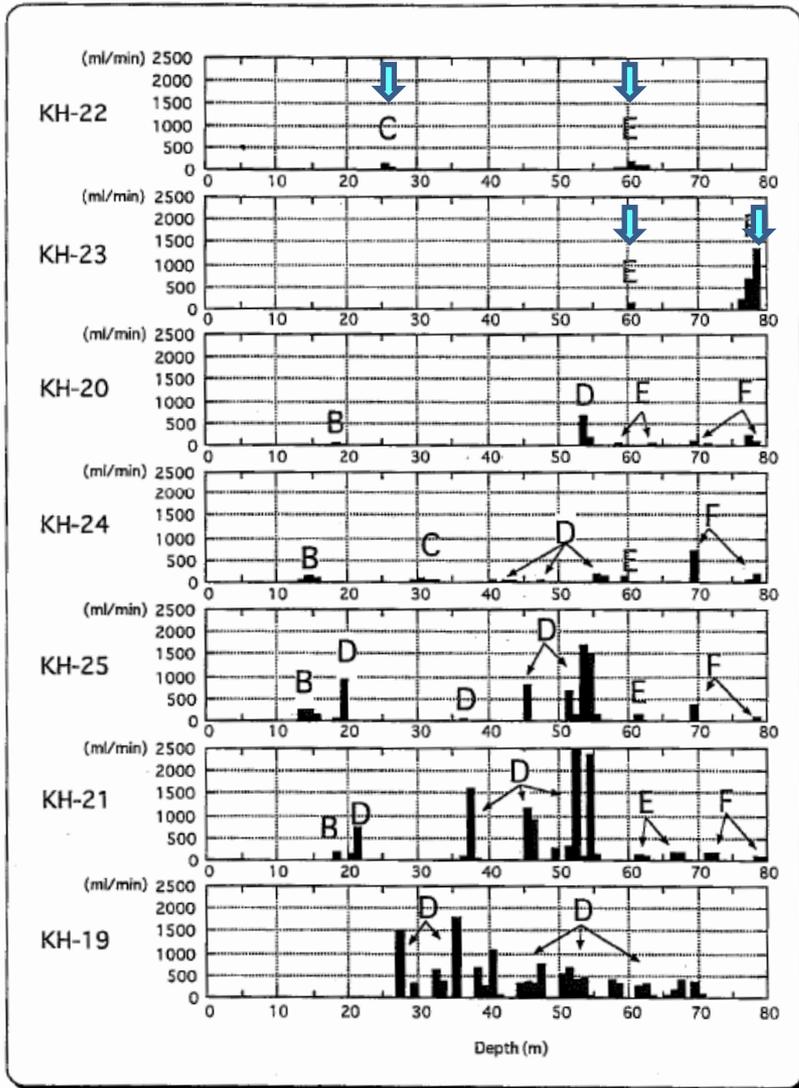
2. 連結性

Connectivity of fractures

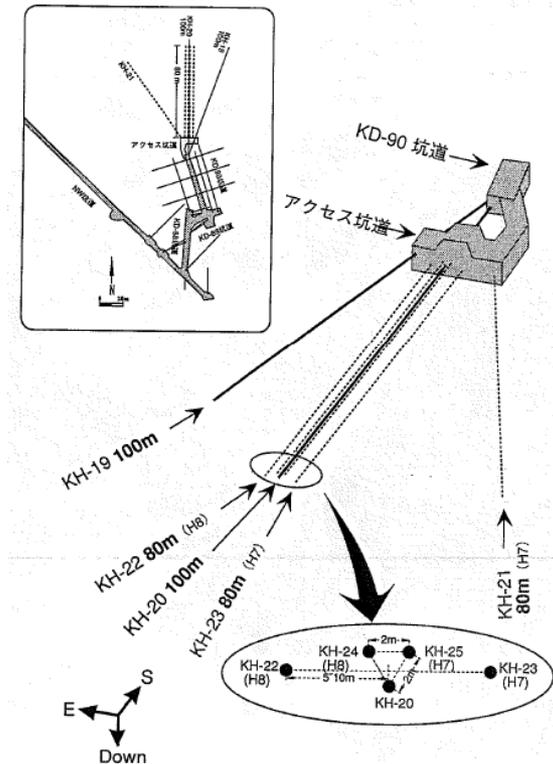
- 従来のDFNモデルは、連結性を過大評価する(overconnectivity)傾向があり、連続体モデルに近い挙動を示す
Traditional DFN models tends to overestimate the connectivity (overconnectivity) and behaves like a continuum model
- 実際の岩盤は、「水みち」が偏在する傾向にあり、これを十分に表現できていない
Conductive pathways in the actual rock are localized and DFN models fail to reproduce
- この問題は、John Blackが指摘しており、Sparse channel network modelが提唱されている
This issue is pointed out by John Black and he proposes “Sparse channel network model”
- 水理コンパートメント
Flow compartment

釜石鉱山トレーサー試験エリアでの流量検層結果

Flow log results in the tracer experiment area of the Kamaishi mine



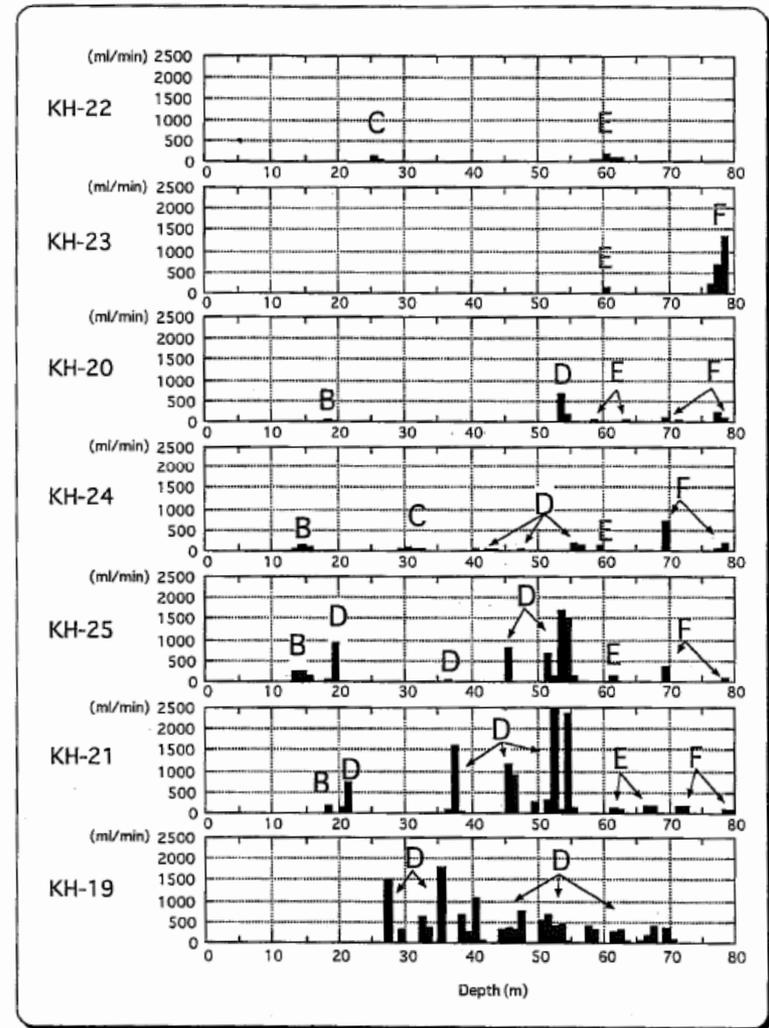
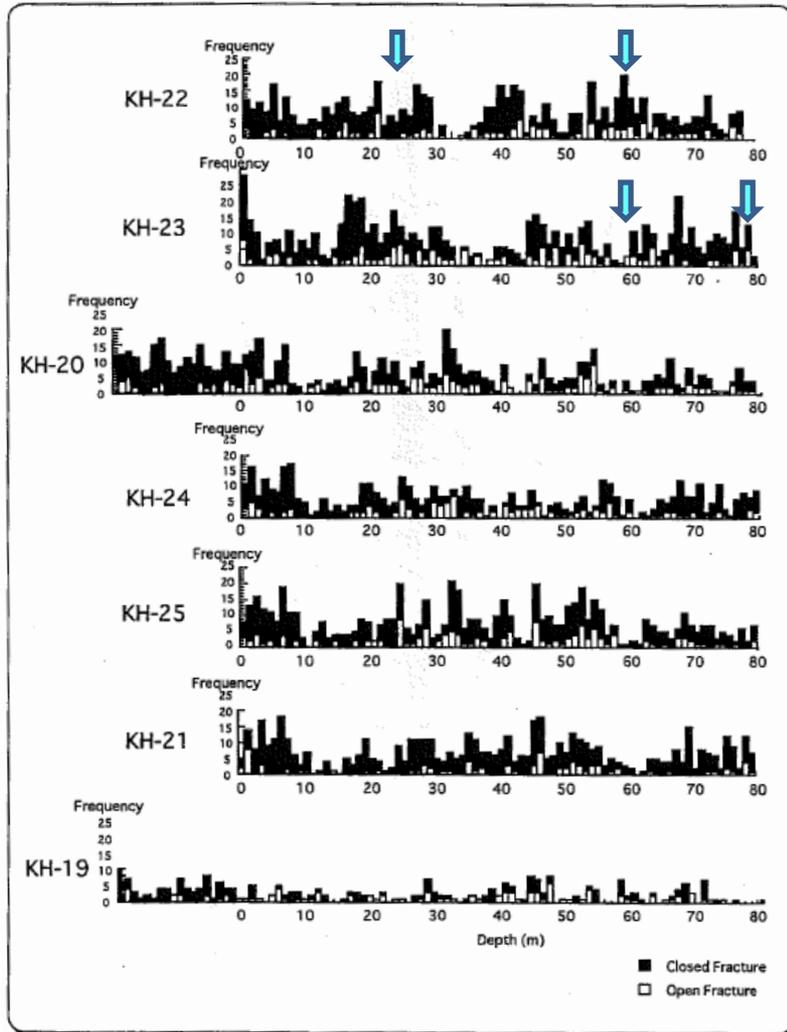
- KH-22孔およびKH-23孔では2箇所ではしか湧水が認められず、湧水箇所が偏在している。
Only 2 outflow points are found in KH-22 and KH-23 indicating outflow points are localized



釜石鉱山トレーサー試験エリアでの亀裂頻度と流量検層結果の比較

Comparison of fracture frequency with flow log

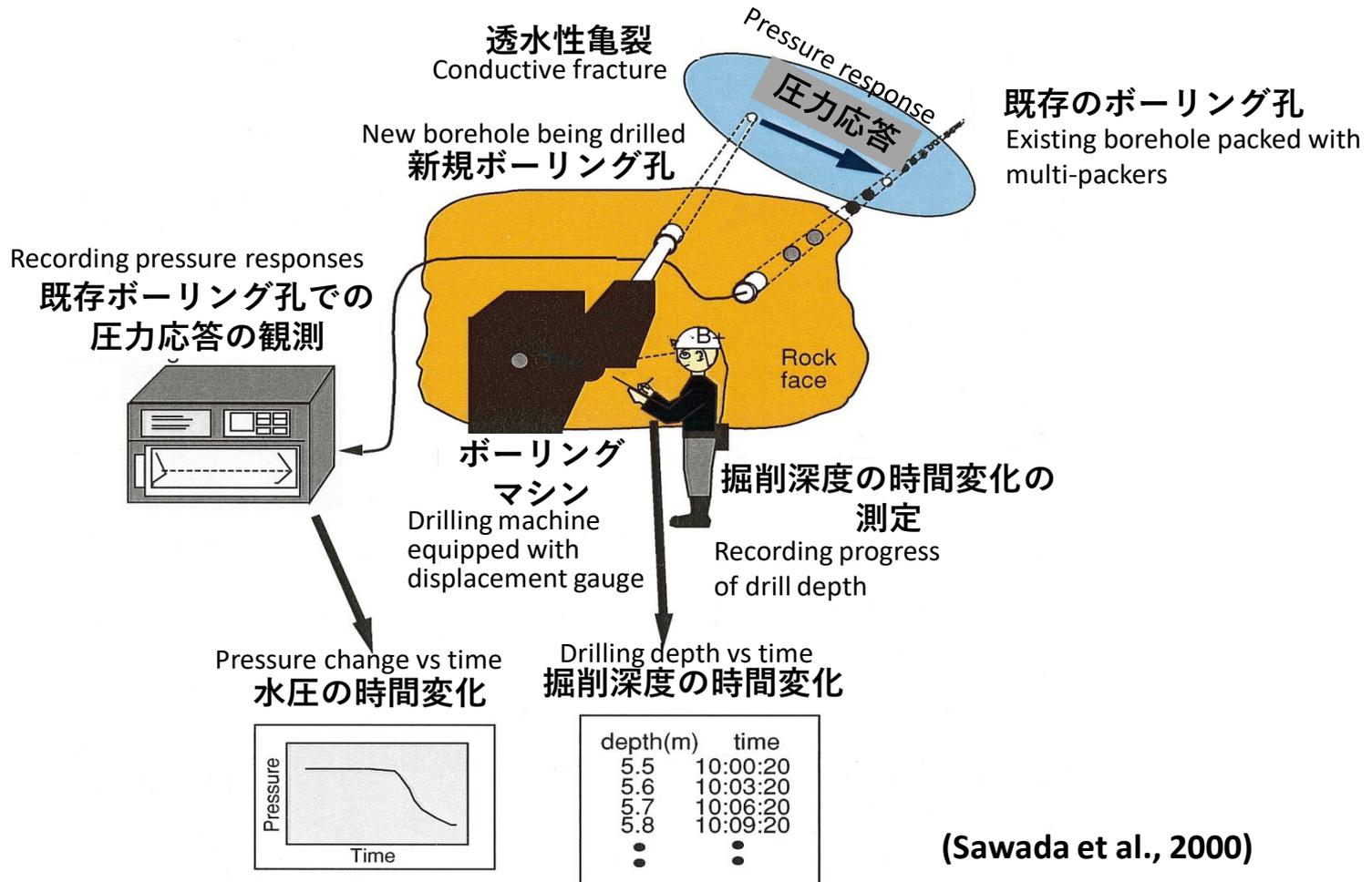
- 透水に寄与するのはごく一部の亀裂である
A limited number of fractures contribute to flow



コンパートメント構造の調査方法

A method for characterizing flow compartments used in the Kamaishi mine

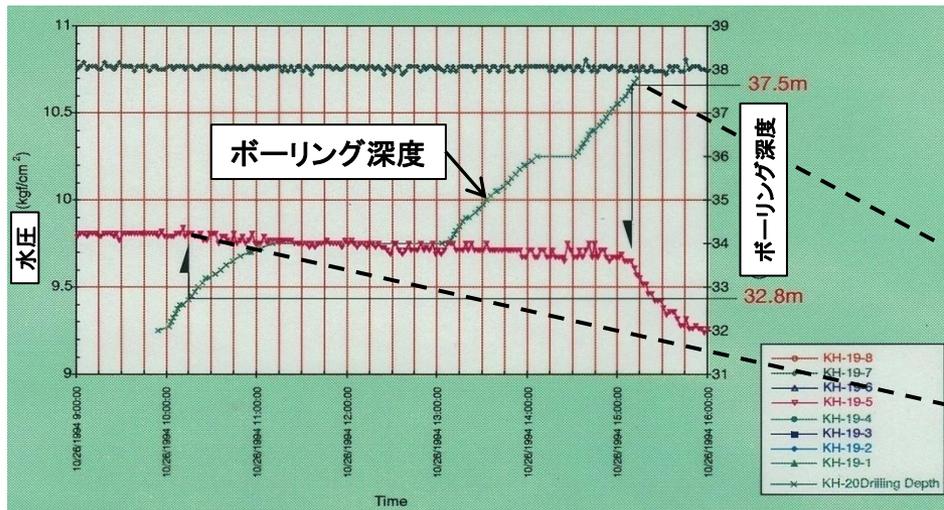
- 掘削深度と水圧変化を同時に記録することにより掘削に伴う圧力干渉を把握
Detect different pressure domain by monitoring drilling progress and pressure response



コンパートメント構造を示唆するデータ

Pressure responses indicating flow compartments

KH-20孔 32.8m, 37.5m掘削時の水圧応答
Pressure responses occurred during drilling at the depth of 32.8 and 37.5m of KH-20

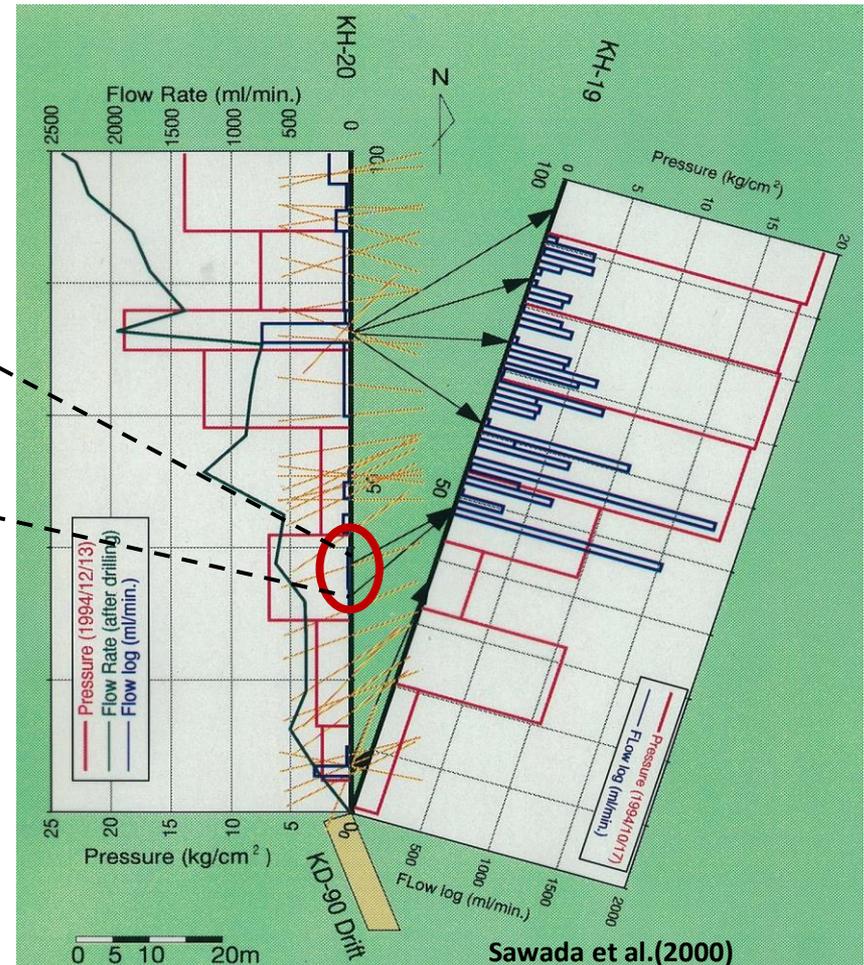


KH-19孔 区間5は応答するがそれ以深の区間は応答しない

→ **コンパートメント構造**を示唆

Only section 5 of KH-19 responded, while other sections not responded

→ Indicate the presence of **flow compartment**

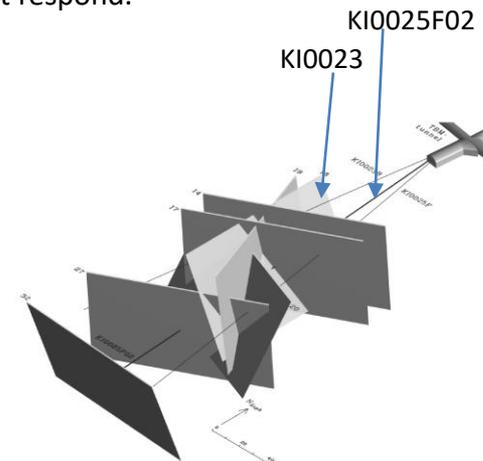
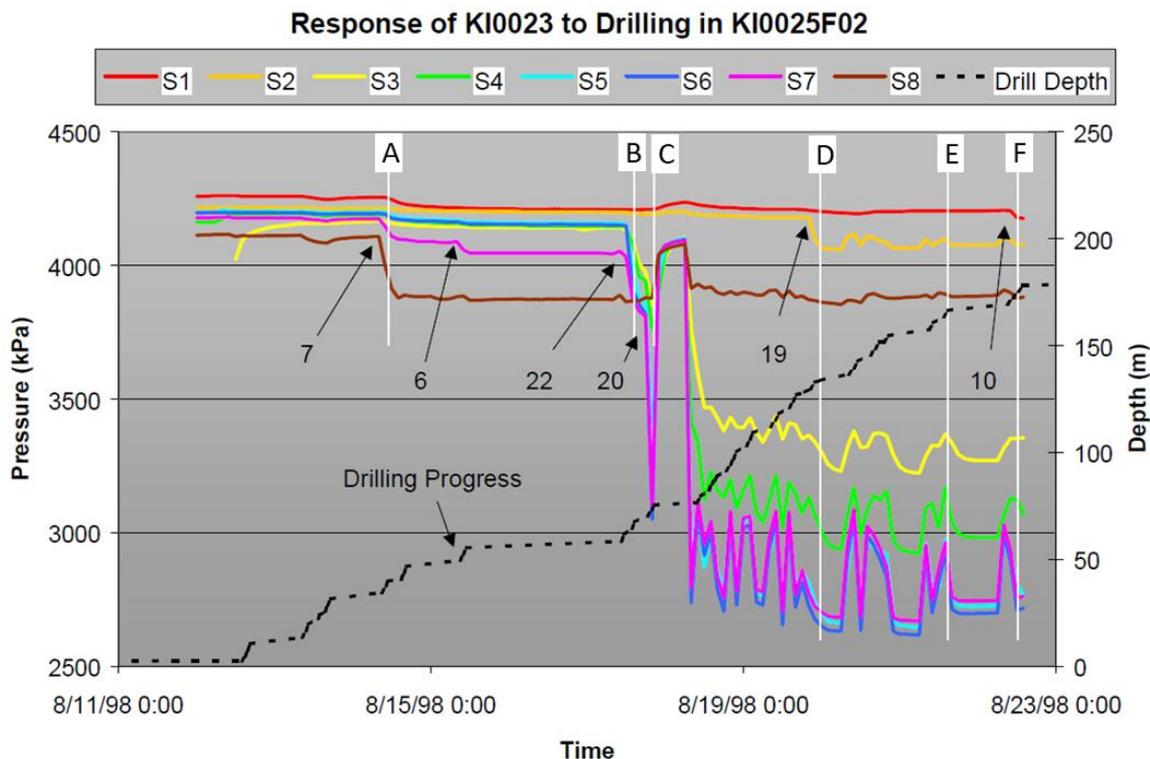


エスポHRL-TRUE Block Scale試験エリアにおけるコンパートメント構造を示唆するボーリング掘削時の応答

Pressure responses indicating flow compartments at the TRUE Block Scale Experiment area in the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden

- KI0025F02孔掘削時に観測孔(KI0023)の一部区間のみ応答し、その他の区間では応答がない
 例 A到達時に、S7とS8が強く応答したが、S2とS3は全く応答せず
 B到達時に、S3,S4,S5,S6が応答開始
 D到達時に、S2が応答開始

Pressure responses are recorded at the specific sections of the monitoring hole (KI0023) during drilling of KI0025F02
 i.e. When drilling reached A, Sections S7 and S8 strongly responded. But, S2 and S3 did not respond.
 When drilling reached B, Sections S3,S4,S5 and S6 started to respond
 When drilling reached D, Sections S2 started to respond



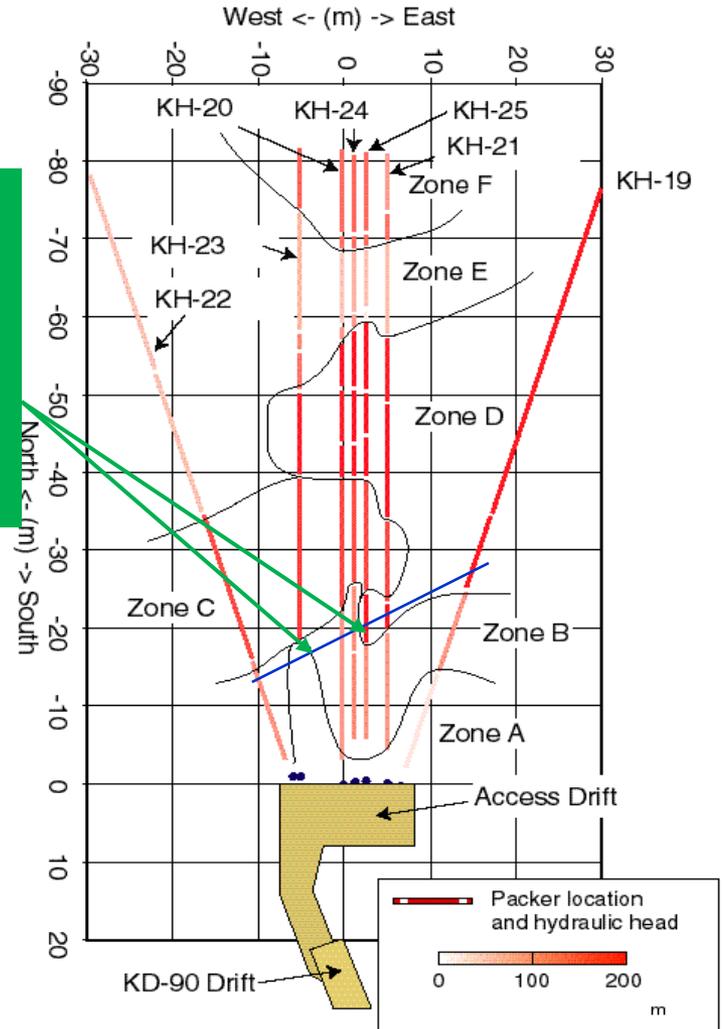
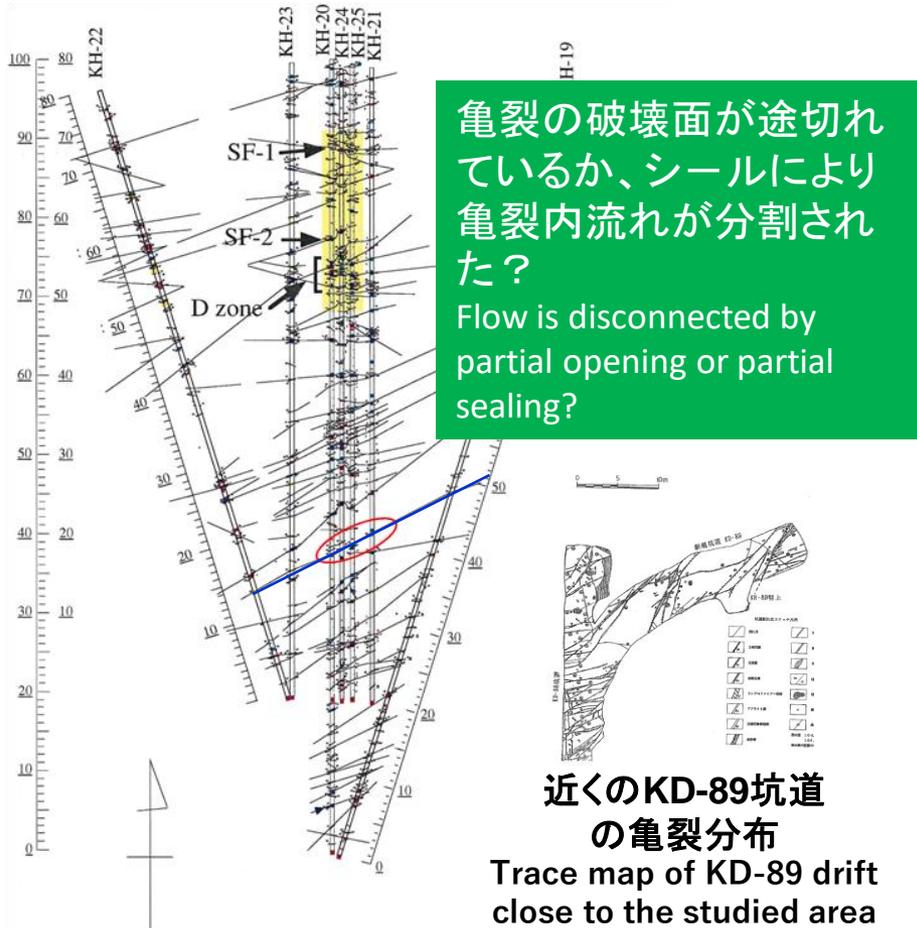
Monitoring Sections (m)

| | |
|------------|--------------|
| KI0023B:P1 | 113.7-200.7 |
| KI0023B:P2 | 111.25-112.7 |
| KI0023B:P3 | 87.20-110.25 |
| KI0023B:P4 | 84.75-86.20 |
| KI0023B:P5 | 72.95-83.75 |
| KI0023B:P6 | 70.95-71.95 |
| KI0023B:P7 | 43.45-69.95 |
| KI0023B:P8 | 41.45-42.45 |
| KI0023B:P9 | 4.6-40.45 |

(Andersson et al, 2002)

地質的連結性と水理的連結性

Geologic connectivity and hydraulic connectivity



ボアホールTVから推定した亀裂ネットワーク
Fracture network predicted from borehole TV log

水頭分布とコンパートメント
Pressure distribution and flow compartment

水みちのモデル化

透水量係数の相関性の仮定

Concepts of flow path modelling

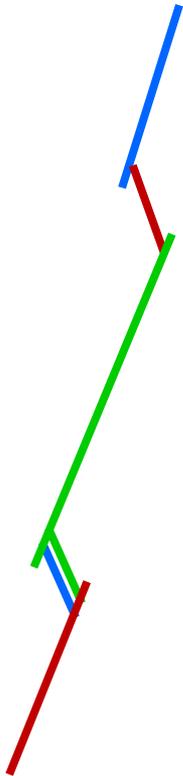
Options for assigning transmissivity

非相関

No correlation

対数正規分布からランダムに
サンプリング

T is randomly sampled from log
normal distribution



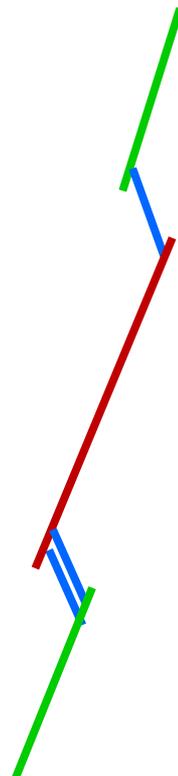
亀裂半径との相関

Positive correlation

between size and T

大きな亀裂ほど高い透水性

Large fracture has higher T

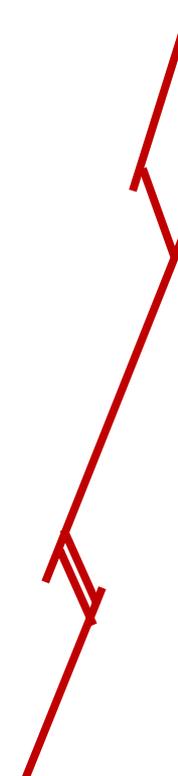


移行経路相関

Pathway correlation

選択的移行経路を形成するよう
高い透水性を設定

T's are assigned so that pathway
becomes preferential path



高透水性の亀裂
High T fracture

中透水性の亀裂
Middle T fracture

低透水性の亀裂
Low T fracture

2. 連結性

Hydraulic Connectivity

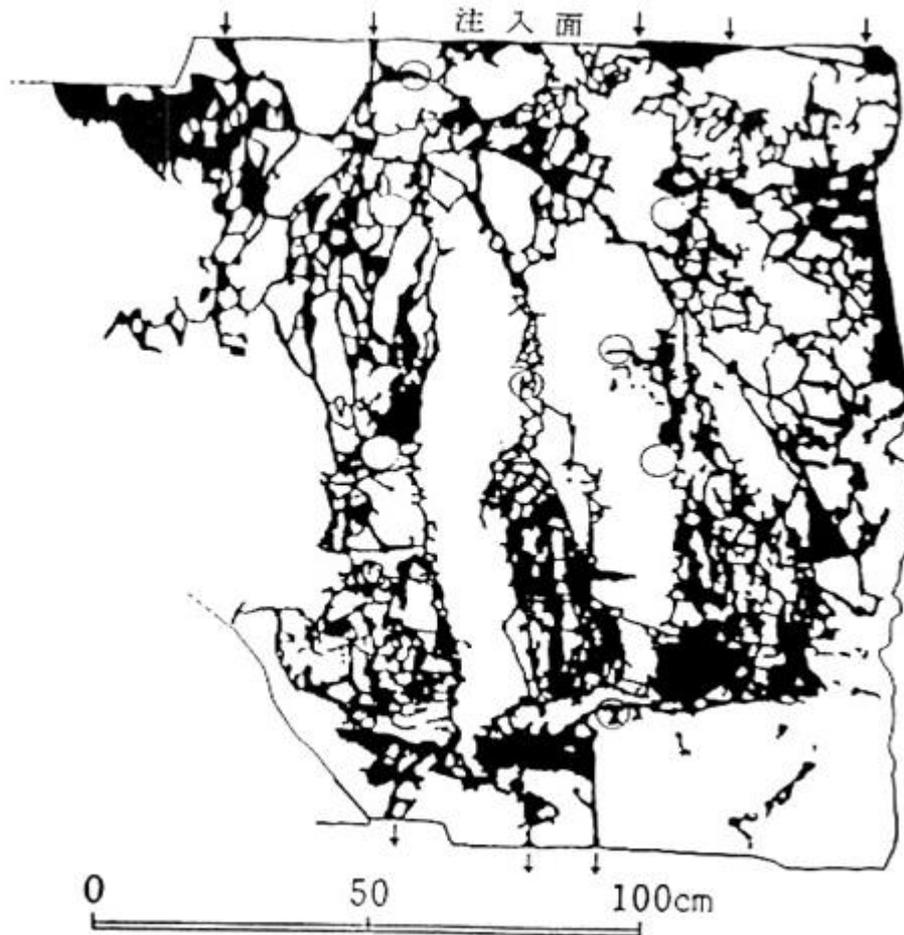
- 亀裂に透水量係数を割り当てる際に、従来はランダムあるいは亀裂サイズとの相関性を考慮していたが、「移行経路相関」のように特定の移行経路に高い透水性を割り当てる必要
Traditional DFN assigns T randomly or correlating to fracture size. There may be a need to assign T to reproduce preferential flow path.
 - ✓その際、非現実的な移行経路とならないよう、移行経路全体の水理的抵抗と移行経路頻度が実測を再現することが重要
It is important to reproduce both measured flow resistance along the flow path and the measured frequency of the flow paths to avoid generating unrealistic pathways
- コンパートメントは、上記とは逆に連結性を遮るような低透水性を割り当てることで再現可能
Flow compartment can be reproduced by assigning low T in the pathway
 - ✓コンパートメントの原因は、充填と開口の複数回の繰り返しにより生じた可能性がある
Flow compartment may be formed by multiple events of sealing and reopening of fractures
 - ✓ただし、コンパートメントは完全に閉じた領域を形成していない可能性があり、不確実性として閉じた場合とそうでない場合の両方のケースを考慮する必要
Flow compartment may not be perfectly closed. Uncertainty such as closed case and non-closed case need to be considered.

内容

Contents

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性
Connectivity of fractures
- チャンネリング
Channeling
 - ① マトリクス拡散寄与面積
Flow wetted surface
 - ② マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth
- まとめ
Summary

3. チャンネリング Channeling

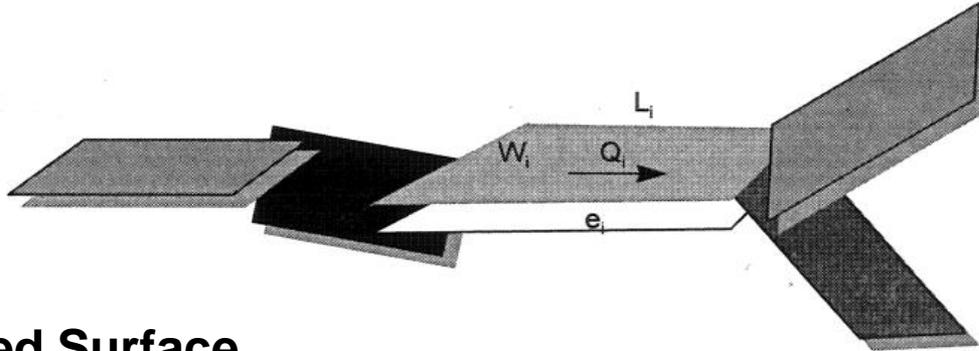


- 2つの課題・不確実性
Two issues/uncertainties
 - ①マトリクス拡散寄与面積
Flow wetted surface
 - ②マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth

(Mito et al., 1990)

Flow Wetted Surfaceと F-パラメータ、u-パラメータ

Flow Wetted Surface, F-parameter, u-parameter



Flow Wetted Surface

$$FWS = W_i L_i$$

F-parameter $F_i = 2 W_i L_i / Q_i$

距離 L_i 下流の地点での濃度 C_f (分散考慮せず、無限大マトリクス拡散深さの場合)

Concentration C_f at the point with distance L_i from source (w/o dispersion, infinite matrix diffusion depth)

$$C_f(L_i, t) = C_0 \operatorname{erfc}(u_i t^{-1/2})$$

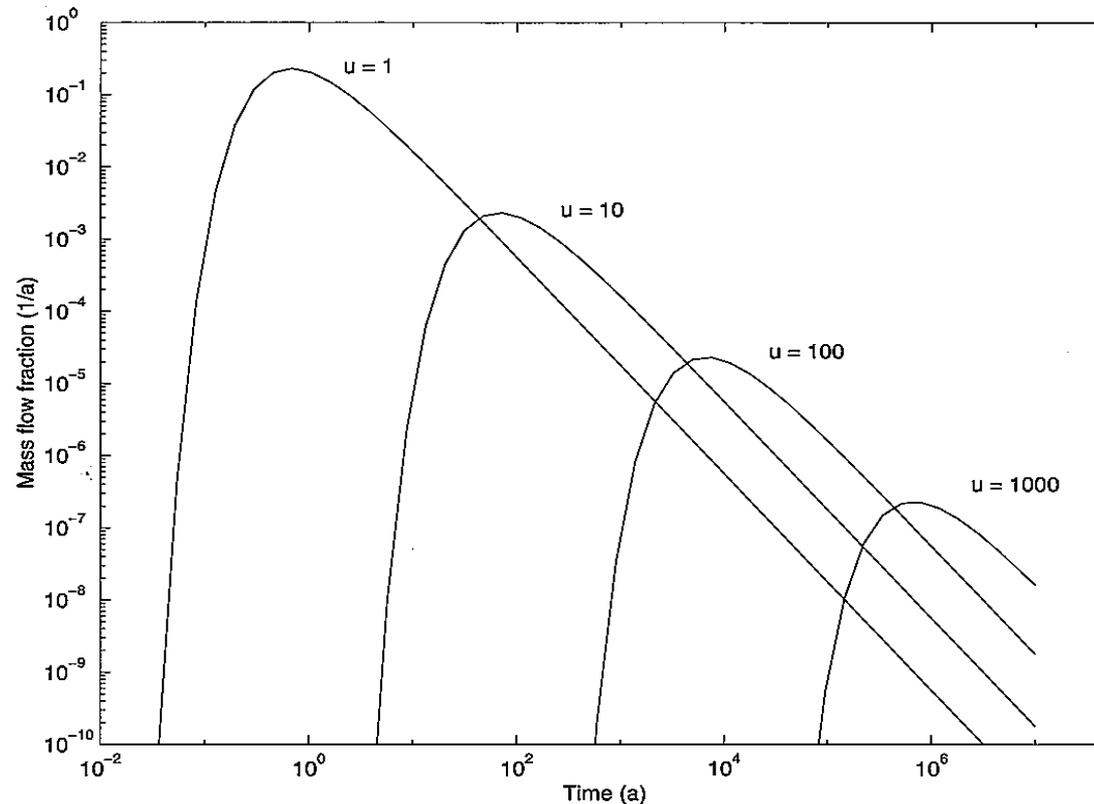
u-parameter: $u_i = F_i \sqrt{D_{m,i} (\epsilon_{m,i} + K_{d,i} \rho)}$ D_m : 拡散係数、 K_d : 分配係数

➡ 収着性トレーサー : $u_{\text{sorb}} \approx F_i \sqrt{D_{m,i} K_{d,i} \rho}$
Sorbing tracer

非収着性トレーサー: $u_{\text{nonsorb}} \approx F_i \sqrt{D_{m,i} \epsilon_{m,i}}$
Nonsorbing tracer

u-パラメータと破過曲線

u-parameter and Breakthrough curves



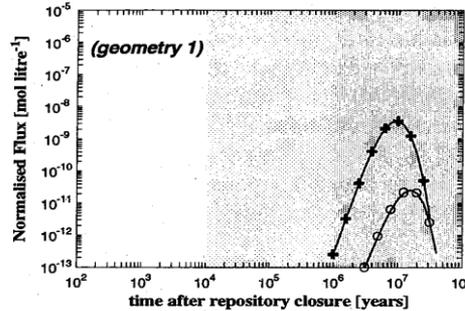
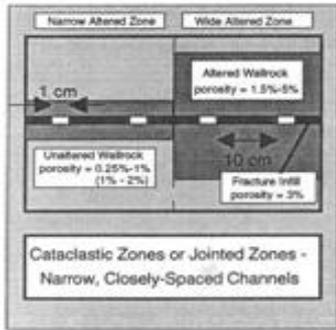
(Vieno et al., 1999)

u-パラメータの増加→ピーク時間の遅れ、ピーク濃度の低下
Larger u-parameter → delay of peak time → decrease in peak concentration

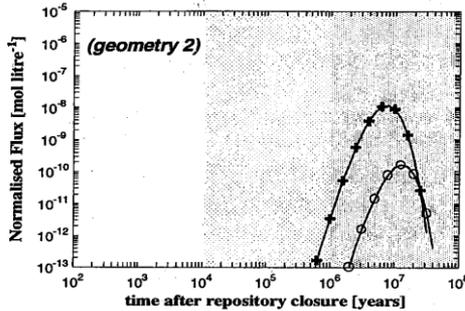
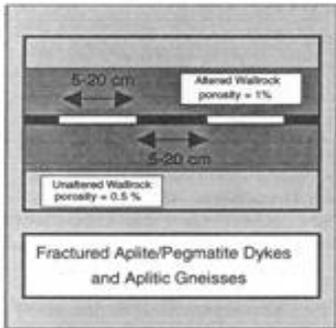
チャンネルリング

—NagraのKrystalline-1における亀裂内部構造のモデル化と評価結果— Channeling

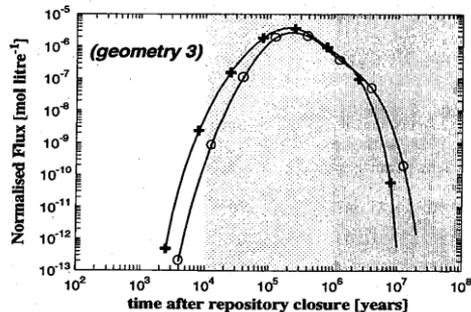
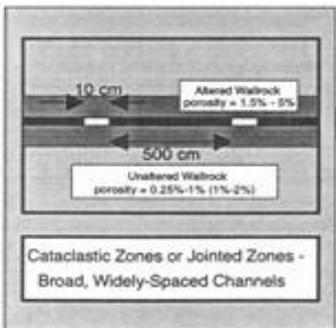
- Different channeling assumptions and resulting nuclide flux in Kristalline-I safety assessment by Nagra -



亀裂の内部構造（チャンネルの幅、間隔）
Internal structure of fracture (width and spacing of channels)



安全評価結果に大きく影響
(約3桁の違いを生じる)
Significant impact on the performance assessment
(approx. 3 orders of magnitude difference)



亀裂の内部構造が重要
Internal structure of fracture is critical

(Nagra, 1993より)

①マトリクス拡散寄与面積

Flow wetted surface

- 2つの課題・不確実性:
Two issues/uncertainties:

i) 亀裂充填物を介したマトリクス拡散寄与面積の増加
Increase in FWS by lateral diffusion through fracture fillings



- ✓ 変質ハローは、チャンネルの両側だけでなく、亀裂のかなりの範囲あるいは全面にわたって生じることが多い
Alteration halo develops along the significant portion of fracture or sometimes along the entire length of fractures

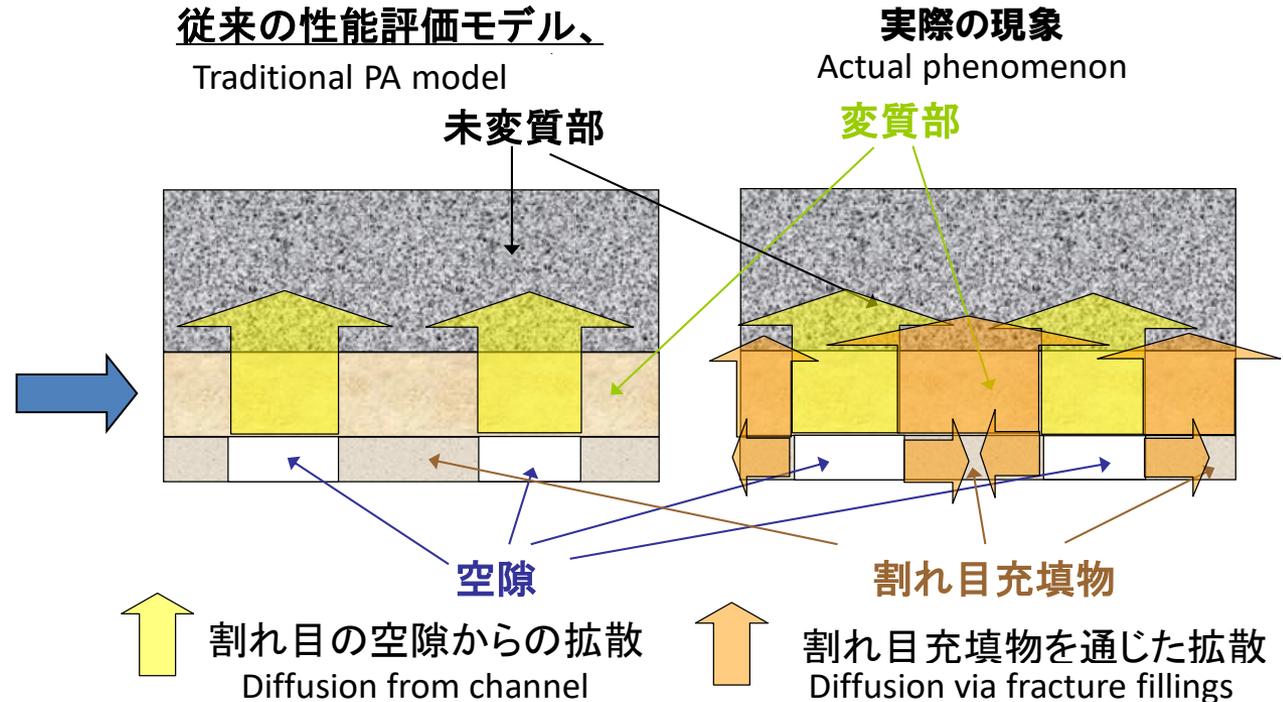
ii) 複雑な内部構造を有する亀裂のマトリクス拡散寄与面積
FWS of fracture with complicated internal structure

移行経路の概念モデル

Conceptual model of single fracture



亀裂全面に生じた変質ハロー

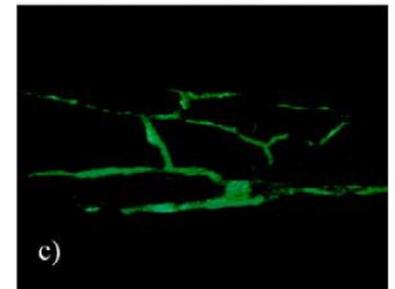
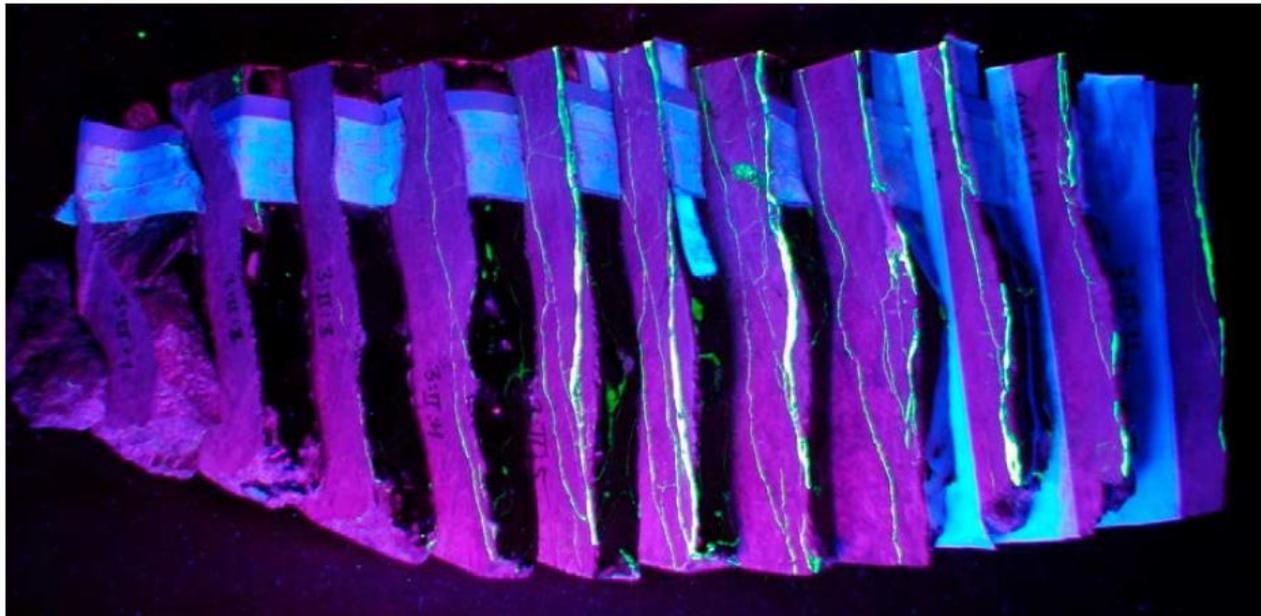


→より広い範囲への拡散が起き、遅延効果が増大する
More fracture surface become available for matrix diffusion,
thereby increase retardation

複雑な内部構造を有する亀裂のマトリクス拡散寄与面積

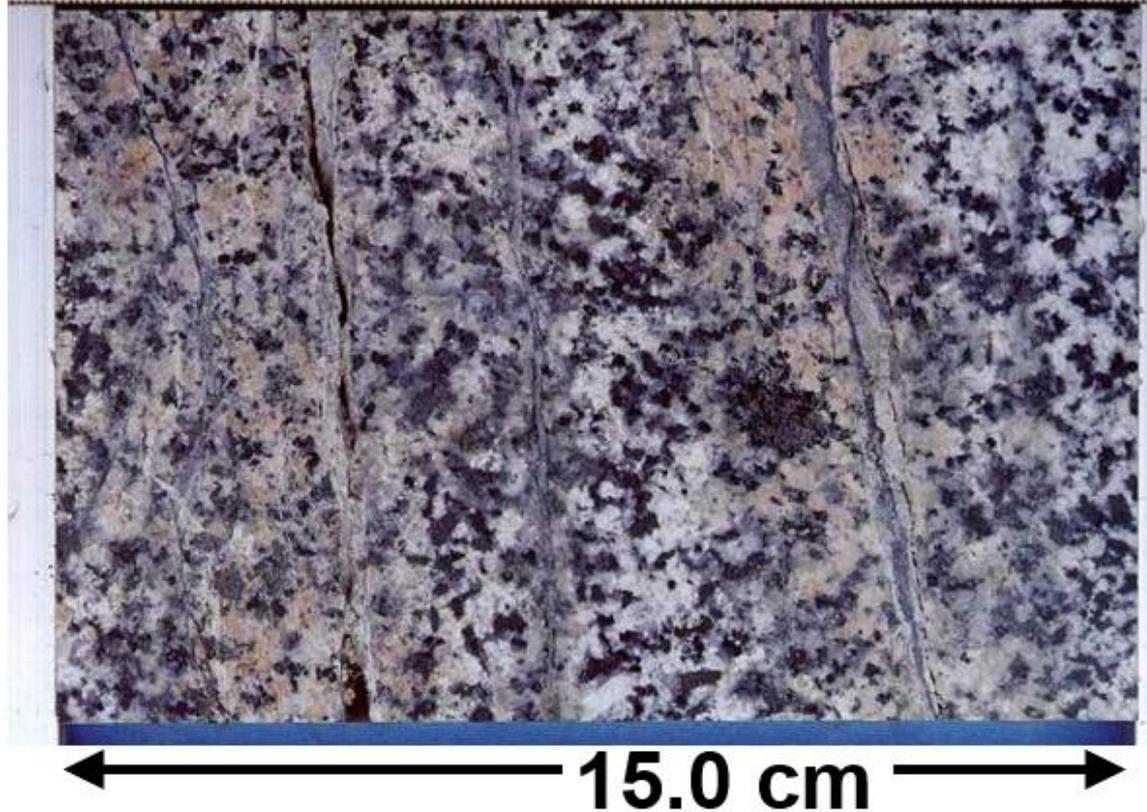
FWS of fracture with complicated internal structure

- 「単一亀裂」であっても内部に複数の破断面が存在
“Single” fractures sometimes have multiple micro fractures
- 安全評価の時間スケールで有効なマトリクス拡散寄与面積の設定が必要
Need to determine effective FWS in the time scale of safety assessment



Äspö地下研究施設におけるTRUE-1トレーサー試験、Feature Aの断面
Cross-sections of Feature A of TRUE-1 Tracer Test Area in Äspö Hard Rock Laboratory

② マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth



釜石鉱山の花崗閃緑岩中の亀裂に生じた変質ハロー
Alteration halo developed along the fracture within the granodiorite in the Kamaishi mine

マトリクス拡散深さ

Matrix diffusion depth

- 安全評価上の重要パラメータ
Important parameter for safety assessment
- それにも拘わらず、2つの意見が対立
Nevertheless, there exist two conflicting opinions:
 - ① 拡散深さに制限はない: スウェーデンSKB
Unlimited diffusion depth: SKB (Sweden)
 - ② 拡散深さに制限がある: Wogelius他(2020)
Limited diffusion depth : Wogelius et al. (2020)
 - ⇒ 2次的方解石が微小空隙を充填することにより拡散深さは亀裂面から数cm以内に制限
Diffusion depth is limited within a few cm due to sealing of micropores by precipitation of secondary calcite
- どちらが正しいのか、あるいは両方を統合的に説明できる別の考え方があるのか検討が必要
Necessary to settle the argument or develop a new idea to reconcile both opinions

チャンネルリングに関する課題・不確実性

Issues and uncertainty of channeling

■ マトリクス拡散寄与面積

Flow wetted surface

- 割れ目充填物を介したマトリクス拡散の効果

Enhanced fracture surface area available for matrix diffusion via fracture fillings

- 複雑な亀裂内部構造を有する場合のパラメータ設定

Determine parameter for fractures which have a complicated internal structure

■ マトリクス拡散深さ

Matrix diffusion depth

- マトリクス拡散深さは制限が存在する vs 存在しない

Limited matrix diffusion depth vs unlimited matrix diffusion depth

内容

Contents

- 亀裂ネットワークモデル(DFN)
Discrete Fracture Network Model (DFN)
- Geo-DFN vs Hydro-DFN
Geo-DFN vs Hydro-DFN
- 連結性
Connectivity of fractures
- チャンネリング
Channeling
 - ① マトリクス拡散寄与面積
Flow wetted surface
 - ② マトリクス拡散深さ
Matrix diffusion depth
- まとめ
Summary

まとめ

Summary

- **亀裂性媒体のモデル化に際して、非透水性亀裂と透水性亀裂の識別と透水性亀裂の亀裂パラメータの設定が重要**

Distinguishing conductive fractures from nonconductive fractures is important. Also, it is important to determine fracture parameters specific to conductive fractures.

- **透水性亀裂は空間的に偏在する傾向があり、「水みち」を形成するように亀裂への透水性の設定が必要。その際、「水みち」の頻度と移行経路全体の透水性について実測値による拘束が必要**

Conductive fractures are unevenly distributed. Transmissivity should be assigned to form preferential pathways. In this case, constraining the frequency of pathways and resistance along the pathways by measurement is important.

- **コンパートメントも不確実性の一つ。完全に閉じていない可能性があり、その不確実性を考慮することが重要**

Flow compartment is one of the uncertainty. There is a possibility that compartments are not fully closed

- **マトリクス拡散寄与面積は、充填物を介した拡散寄与面積の増加、複雑な内部構造を有する場合の評価、が課題**

As to flow wetted surface, possible increase due to lateral diffusion through fracture fillings and evaluation of FWS of “single” fracture with multiple micro fractures are the issues.

- **マトリクス拡散深さは有限とする考え方と無限とする考え方が対立しており、統一した見解が必要**

There is an argument over limited matrix diffusion depth vs unlimited matrix diffusion depth. Necessary to settle the argument or develop a new idea to reconcile both opinions



ご清聴ありがとうございました
謝謝您們的聆聽