

廃炉に関する基盤研究を通じた 創造的人材育成プログラム —高専間ネットワークを活用した 福島からの学際的チャレンジ—

福島工業高等専門学校
廃止措置研究・人材育成推進室長 青柳克弘

大学、国立研究期間、地元企業などの協力の下で、全国の高等専門学校での卒業研究／特別研究を通じて 廃止措置に関する基盤研究を実施し、研究を通じた人材育成を進める。研究を支える教育プログラムでは、講義や実験、人間力を高めるインターンシップを実施する。また、廃炉に関する施設を研究・教育に役立てる。以上の取組を通じて中長期的観点から高い志 と幅広い知識を持った学生を育てる。

本事業の3本柱

廃止措置人材育成高専等連携協議会

廃止措置事業の3本柱

- ・原子力専門外の教員の参加、協力
- ・教育内容の充実化、連携

卒業研究
特別研究
研究開発

教育

原子力機構施設利用

構築遠隔技術開発センター
大熊分析・研究センター
廃炉国際共同研究センター

- ・全国高専教員との共同研究連携
- ・他高専教員との専攻科生連携指導

- ・全国高専関係者の施設利用に関して福島高専がとりまとめ

- ・事業：原発廃炉に向けた基盤研究・人材育成等
- ・会員：連携協議会の目的に賛同する高専校長・教職員、大学・原子力関係法人等の学識経験者・技術者等
- ・会長：山下福島高専校長
- ・事務局：福島高専内
- ・運営委員会：本会の運営執行決定
- ・WG：研究、人材育成内容等の立案

	団体数	入会者数	校長入会者数
高 専	37	101	25
大 学	7	13	
企 業	23	27	
自治体	2	2	
計	69	143	25

2020/2 現在

廃炉創造学修プログラム

5 年生 : 原子力事故総論 (1 単位)
卒業研究

4 年生 : 廃炉工学 (1 単位)
放射線関連実習・インターンシップ

3 年生 : 廃炉と社会 (1 単位)
廃炉ロボット概論 (1 単位)

2 年生 : 放射線基礎 (1 単位)

1 年生 : 原子力発電基礎 (1 単位)

工学科
機械システム

電気電子シス
テム工学科

工学科
化学・バイオ

工学科
都市システム

ビジネスコミュニ
ケーション学科

平成27年度

3年生：廃炉と社会	60人	4年生：廃炉工学	10人	合計70人
-----------	-----	----------	-----	-------

平成28年度

2年生：放射線基礎	100人	3年生：廃炉ロボット概論	63人	
3年生：廃炉と社会	65人	4年生：廃炉工学	50人	
				合計278人

平成29年度

1年生：原子力発電基礎	57人	2年生：放射線基礎	115人	
3年生：廃炉ロボット概論	84人	3年生：廃炉と社会	23人	
4年生：廃炉工学	44人	5年生：原子力事故総論	64人	
				合計387人

平成30年度

1年生：原子力発電基礎	52人	2年生：放射線基礎	59人	
3年生：廃炉ロボット概論	111人	3年生：廃炉と社会	37人	
4年生：廃炉工学	22人	5年生：原子力事故総論	16人	
				合計297人

令和元年度

1年生：原子力発電基礎	71人	2年生：放射線基礎	69人	
3年生：廃炉ロボット概論	61人	3年生：廃炉と社会	59人	
4年生：廃炉工学	64人	5年生：原子力事故総論	18人	
				合計342人

高専海外サマースクール

平成28年度（6名）

アメリカ：リッチランド・PNNL / KURION、シリコンバレー

（福島高専1名、茨城高専2名、香川高専2名、北九州高専1名）

平成29年度（6名）

アメリカ：ハンフォード、KURION、UCバークレー

（八戸高専1名、福島高専1名、茨城高専1名、富山高専1名、
香川高専1名、北九州高専1名）

平成30年度（6名）

アメリカ：ハンフォード、KURION、UCバークレー

（福島高専2名、茨城高専1名、富山高専1名、香川高専2名）

令和元年度（6名）

ウクライナ、オーストリア：チェルノブイリ、IAEA

（旭川高専1名、福島高専1名、茨城高専1名、小山高専1名、
富山高専1名、香川高専1名）

B Reactor の見学



UCバークレーの見学



チェルノブイリ 石棺の前で



チェルノブイリ 原子炉近くの慰霊碑



廃炉創造ロボコン

第1回（平成28年度）15チーム

函館高専（2チーム） 旭川高専 仙台高専（2チーム） 福島高専
東京高専 富山高専 舞鶴高専 奈良高専 高知高専 北九州高専
熊本高専 都立産技高専 大阪府大高専

文部科学大臣賞 大阪府大高専 TAPPAR

第2回（平成29年度）16チーム

旭川高専 一関高専（2チーム） 福島高専 小山高専 富山高専
長野高専 鈴鹿高専 舞鶴高専 奈良高専 呉高専 高知高専
北九州高専 熊本高専 大阪府大高専 神戸市立高専

文部科学大臣賞 奈良高専 奈良廃炉ロボコン友の会

第3回（平成30年度）16チーム

一関高専（2チーム） 鶴岡高専 福島高専 茨城高専 小山高専
長岡高専 富山高専 鈴鹿高専 奈良高専 舞鶴高専 呉高専 熊本高専
大阪府大高専 神戸市立高専 マレーシア工科大学

文部科学大臣賞 長岡高専 ロボティクス部OB CanDI

第4回（令和元年度）18チーム

旭川高専 一関高専（2チーム） 鶴岡高専 福島高専 茨城高専
小山高専 富山高専 鈴鹿高専 奈良高専 舞鶴高専 呉高専 高知高専
熊本高専 大阪府大高専 神戸市立高専 サレジオ高専
マレーシア工科大学

文部科学大臣賞 鶴岡高専 鶴岡高専Bチーム かきぴー

第4回廃炉創造ロボコン（令和元年12月15日）

競技課題

1) 競技フィールド

福島第一原子力発電所のペDESTAL下部に存在する燃料デブリ取出しを想定し、ペDESTALモックアップを競技フィールドとする。外部からペDESTAL内部へのアクセスは呼び
外径250、長さ4000mmの塩ビパイプ（VP250 外径267mm×内径240mm）を使う。

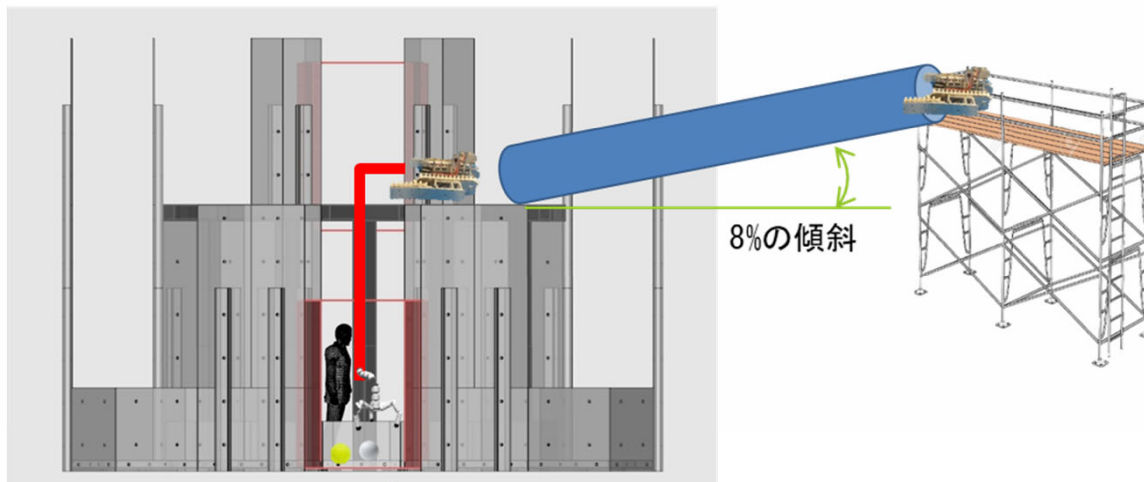
2) フィールド環境

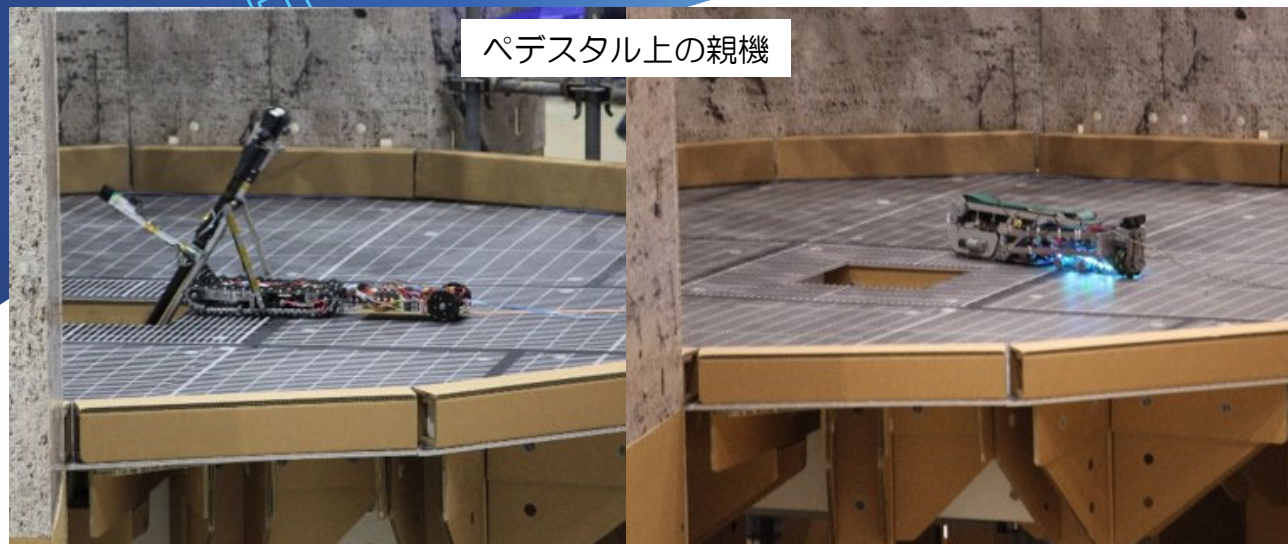
- ①ロボットを遠隔で操作するため、本体を直視することができない。
- ②コンクリートの厚い壁があることから電波は直接届かない。

3) ロボットが遂行する課題

プラットフォームから3.2m下にあるデブリを模した物体を回収し、ペDESTALの外に移動させる。なお、デブリを模した物体は以下のものをそれぞれ3個ずつ床の上に置く。

- ・テニスボール
- ・ゴルフボール
- ・重量及び形状不明のデブリ模擬体





ペデスタル上の親機



ペデスタル下部で
デブリ模擬体を回収する子機



ボールの回収に成功した
鶴岡高専チーム



開会式（選手宣誓）



競技終了後、来場者との懇談

高専で行なっている廃炉関連研究の特徴

- 多数の高専などが参加し広範な領域をカバー
- 実用化への距離が大きくない課題設定

炉内遠隔操作機器(デブリ切削、機器設計統合等)
遠隔操作法基盤技術(VR、ホットラボ分析機器等)
廃棄物の処理処分(反応生成物、セメント固化等)
炉内生成物推定(建屋の加熱による損傷推定等)
社会科学的アプローチ(作業安全への寄与)

廃炉に関する基盤研究を通じた創造的人材育成プログラム
-高専間のネットワークを活用した福島からの学際的チャレンジ-

研究開発部分の紹介

- ・高専が多いので、比較的小規模な課題を多数設定し、
関与する教員及び学生数を確保 → 人材育成も重視
- ・工学及び社会科学課題(6課題) --- 大型の遠隔機器は断念
- ・**廃炉工程の流れの視点から、
代表的な成果をピックアップして説明する**

(1)サンプリング→(2)ホット試験/解析→(取**出し**→)(3)廃棄

廃炉に関する基盤研究を通じた創造的人材育成プログラム
-高専間のネットワークを活用した福島からの学際的チャレンジ-

研究開発部分の紹介

(1)サンプリング→何でも切れる放電加工、
ステージ(1) 小型放射線計測機器他

(2)ホット試験/解析→微小試料評価(ナノ硬さ)、
ステージ(2) 構造健全性推定(コンクリート)他

(3)廃棄 → 合理性の高い発熱性廃棄物の扱い
ステージ(3) (保管 + セメント固化による)他

研究開発課題

比較的小規模な課題を多数設定 関与する教員及び学生数の確保を期した

①炉内遠隔操作機器開発

②性状分析用遠隔操作機器開発*

③廃棄物の貯蔵と処分の手法検討

④性状分析手法及び遠隔操作機器の基礎技術開発*

⑤炉内生成物推定(損傷/強度)

工学的課題

⑥作業環境と研修内容の改善による作業安全性向上の可能性(社会科学課題)

多岐にわたるため、**廃炉過程(適用)**に沿って、代表的な成果をピックアップして示します(廃炉過程の例を3ケース設定)

*ホット試験機器開発含む

全国の高専、大学、研究機関、地元の企業などの協力により、事業を推進できた --- 連携/分担の例を示す

報告書には、
①から⑥の各項目での連携分担関係を記述

下図は①の場合だが、開発実施担当機関以外の高専も参加し、議論を行いつつ、IRID、CLADSからも、さらにNDFの参加を頂き、効果的な開発を期した



廃炉作業の流れに沿った研究開発項目の設定(作業や試料の流れ)

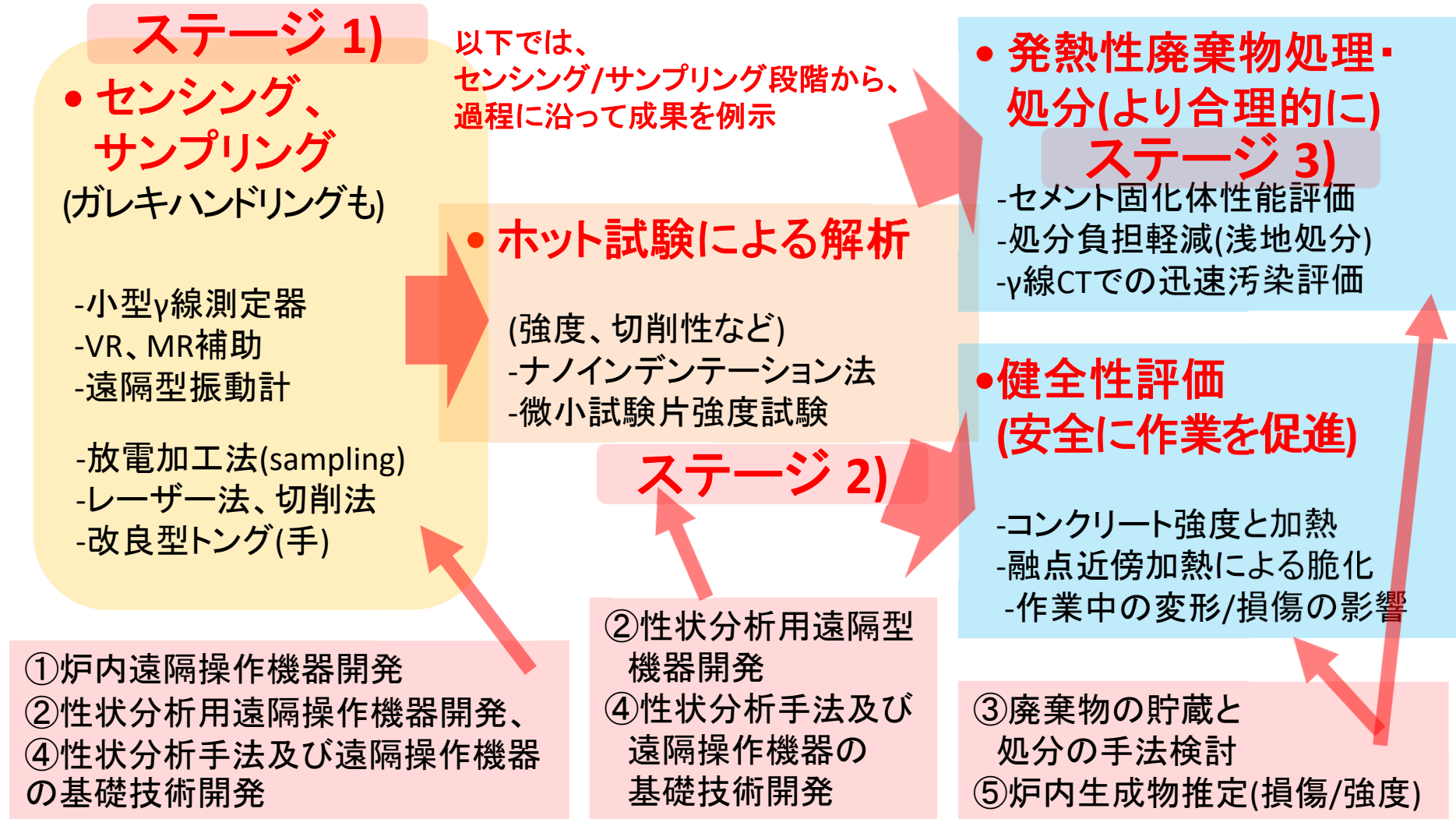


図 廃炉工程の流れと研究開発項目の①から⑤

1) 炉内の核種/損傷分布評価とサンプル採取(軽量リグ; 遠隔機器への適合性)

ステージ 1) - 1/3

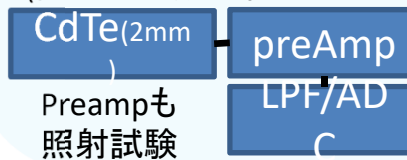
• I センシング、 II サンプリング (ガレキハンドリングも)

- 小型γ線測定器
- VR、MR補助
- 遠隔型振動計
- 放電加工法(sampling)
- レーザー法、切削法
- 改良型 tong (手)

- ① 炉内遠隔操作機器開発
- ② 性状分析用遠隔操作機器開発、
- ④ 性状分析手法及び遠隔操作機器の基礎技術開発

I-a 核種分布評価 → I-b 損傷(加熱等)分布推定

小型γ線検出器
(回路の耐放射線性も評価)

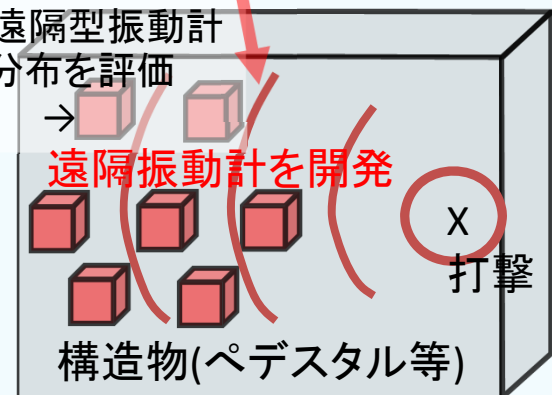


遠隔型振動計、色彩測定(染色後)

- 弾性率から損傷分布を推定する

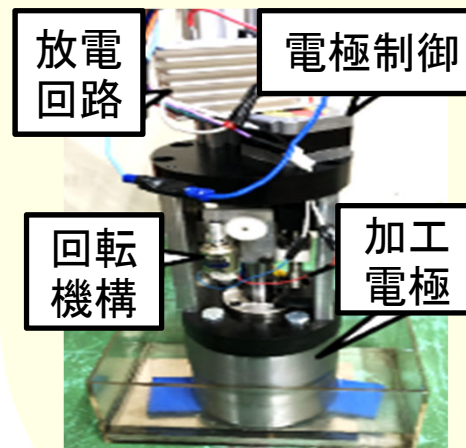
振動→弾性率→強度

多数の遠隔型振動計
で損傷分布を評価



(染色後の色彩分布から事故時温度を推定)

II CV内からサンプル セラミック/金属に対応する放 電加工法(全てを切削可?)



← 放電加工によるコ
ンクリート切削

他に、レーザー法、
機械切削法も開発

重量<10kg IRIDのアーム装置にも適合

1) 炉内の核種/損傷分布評価とサンプル採取(軽量リグ; 遠隔機器への適合性)

ステージ 1) - 2/3

• I センシング、 II サンプルング (ガレキハンドリングも)

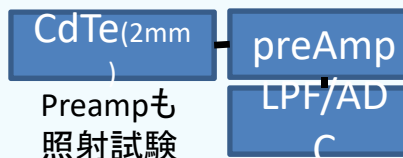
- 小型γ線測定器
- VR、MR補助
- 遠隔型振動計
- 放電加工法(sampling)
- レーザー法、切削法
- 改良型トンク(手)

- ① 炉内遠隔操作機器開発
- ② 性状分析用遠隔操作機器開発、
- ④ 性状分析手法及び遠隔操作機器の基礎技術開発

I-a 核種分布評価 → I-b 損傷(加熱等)分布推定

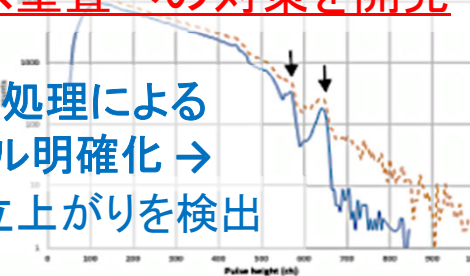
- 小型γ線検出器

実用に向け回路の耐放射線性も評価



・高すぎる線量率場で生じる
パルス重畳への対策を開発

デジタル処理による
スペクトル明確化 →
パルスの立上がりを検出

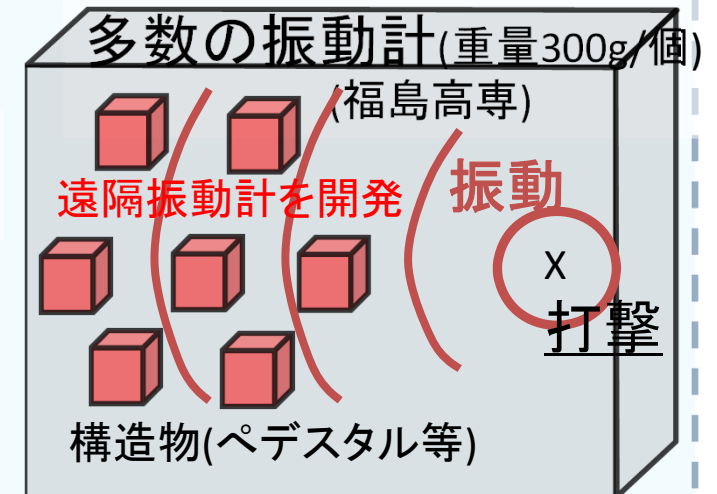


遮蔽(8kg)による
適用領域拡大
(都市大)

重量<10kg IRIDのアーム装置にも適合

- 遠隔型振動計を複数配置し

弾性率から損傷/温度分布推定
打撃の振動を遠隔で同時検出
時間差から弾性率; 強度/温度分布



染色後の色彩分布からも事故時
温度が推定可能(都城高専)

1) 炉内の核種/損傷分布評価とサンプル採取(軽量リグ; 遠隔機器への適合性)

ステージ 1) - 3/3

• I センシング、 II サンプリング

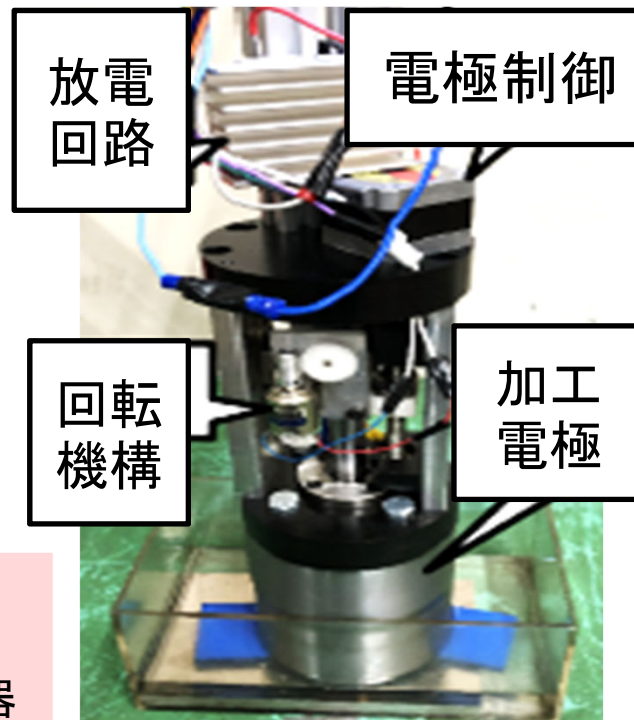
(ガレキハンドリングも)

- 小型γ線測定器
- VR、MR補助
- 遠隔型振動計
- 放電加工法(sampling)
- レーザー法、切削法
- 改良型トング(手)

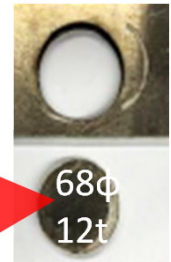
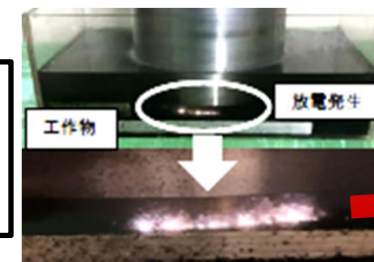
II CV内からサンプル

全てのセラミック/金属を切断できる

- 放電加工法(産技高専); レーザー法, 機械切削も



● コンクリート切削例
ジルコニア、窒化ケイ素も



回転電極による安定した加工

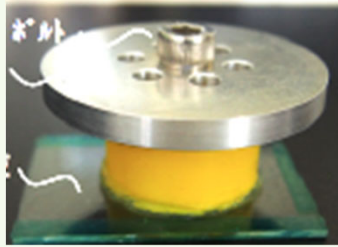
100m長ケーブルを用いた
遠隔加工に成功(実用性)

- ① 炉内遠隔操作機器開発
- ② 性状分析用遠隔操作機器開発、
- ④ 性状分析手法及び遠隔操作機器の基礎技術開発

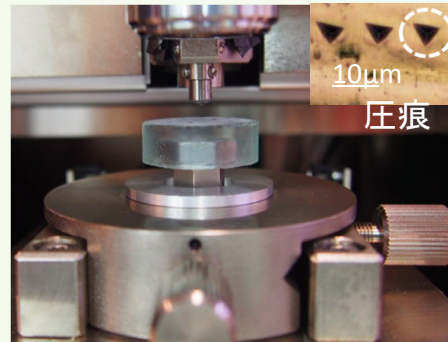
重量<10kg IRIDのアーム装置にも適合

2) 微小サンプルホット試験能力を拡張 → デブリ切削法/残存機器強度

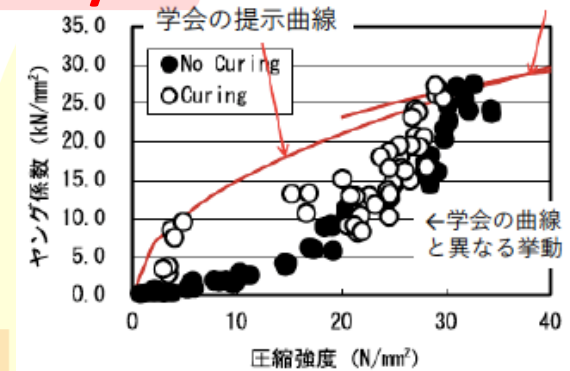
ステージ 2) - 1/3



ナノ硬さ利用法開発に加え、ホットラボ用の試料セット治具を開発



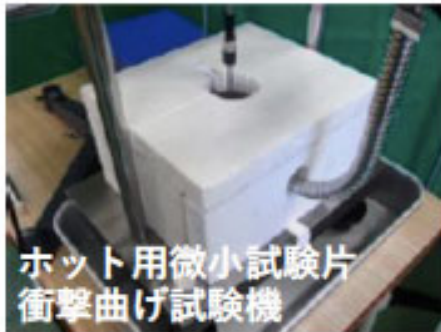
ホット用ナノ硬さ試験機開発
微小サンプルから硬さ等を抽出
→ 切削法選択
→ 損傷の評価



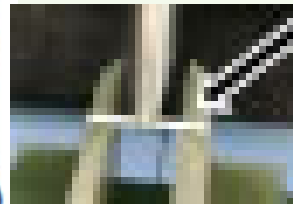
• ホット試験による解析

(強度、切削性など)
- ナノインデンテーション法
- 微小試験片強度試験

ホット用曲げ試験機開発



恒温槽 (0°C ~ -190°Cまで)



← 微小試料の曲げ試験

ホット用曲げ試験機開発

微小サンプルから硬さ等を抽出
→ 切削法選択
→ 損傷/強度/健全性の評価へ

• 健全性評価 (安全に作業を促進)

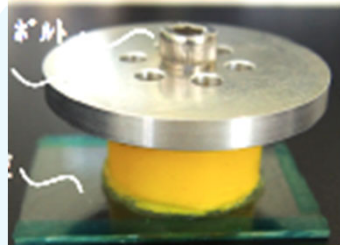
- コンクリート強度と加熱
- 融点近傍加熱による脆化
- 作業中の変形/損傷の影響

② 性状分析用遠隔型機器開発

④ 性状分析手法及び遠隔操作機器の基礎技術開発

③ 廃棄物の貯蔵と処分の手法検討
⑤ 炉内生成物推定(損傷/強度)

2) 微小サンプルホット試験能力を拡張 → デブリ切削法/残存機器強度



ホット試料ステージ

ホット用微小試料固定法
及び試験治具を開発(茨城高専)

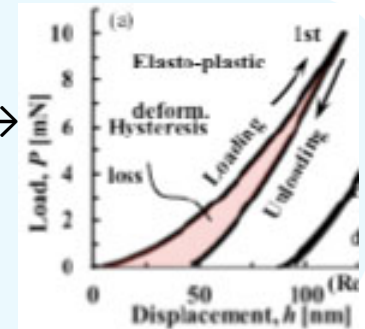


ステージ2)-2/3 -ホット用ナノ硬さ

試験機 荷重-変位曲線例→



←微小な圧痕
微小サンプル
からデータ



・ホット試験による解析

(ナノ硬さはホットラボでも導入方向)

- (強度、切削性など)
- ナノインデンテーション法
- 微小試験片強度試験

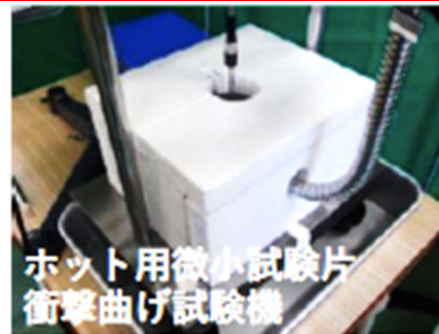
微小サンプルから硬さ、
破壊靱性、弾性率等

→切削法選択

→損傷の評価

を可能に

-ホット用曲げ試験機



恒温槽 (0°C ~ -190°Cまで)

破壊靱性値を測定

しばしば、切削性推定に、
破壊靱性値+硬さを要す

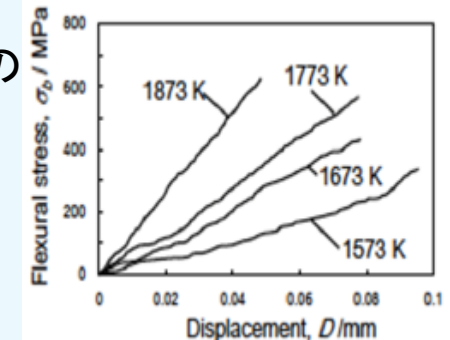


ロードセル ←微小試料の曲げ試験

②性状分析用遠隔型
機器開発

④性状分析手法及び
遠隔操作機器の
基礎技術開発

曲げ試験の
荷重-変位
曲線例→
(都城高専)

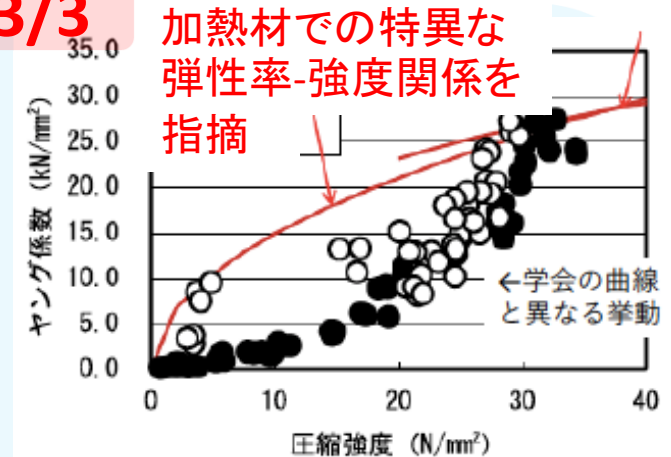
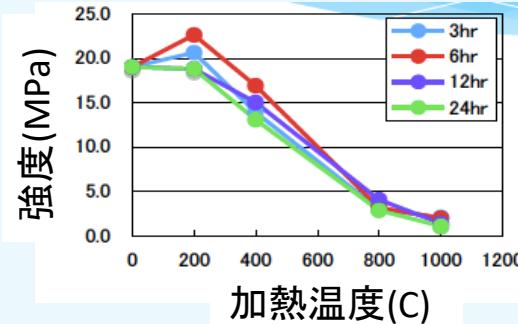


ジルコニア
試料(焼結温度をパラメータ)

2) 微小サンプルホット試験能力を拡張 → デブリ切削法/残存機器強度

ステージ 2) - 3/3

-加熱によるコンクリート劣化評価



加熱後の微細組織/弾性率/強度関係を取得
サンプルの弾性率と弾性率-強度関係から健全性推定

-加熱や変形による(CV)鋼の劣化の評価

短時間の高温加熱(>1300°C)、
少量の塑性変形(~5%)が、
脆性的な挙動をもたらす
微細組織で判断可能



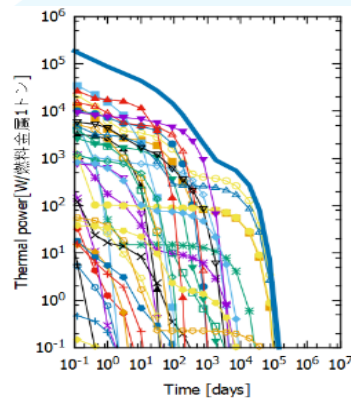
加熱 or の微細組織/弾性率/強度関係を取得
サンプルの微細組織/硬さから靱性、健全性推定

●健全性評価 (安全に作業を促進)

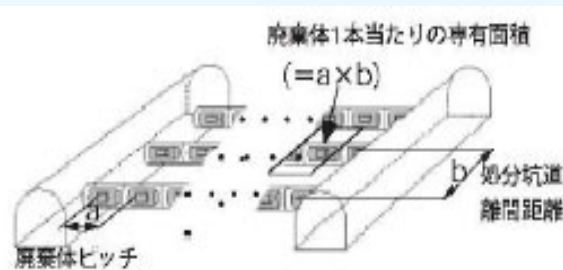
- コンクリート強度と加熱
- 融点近傍加熱による脆化
- 作業中の変形/損傷の影響

- ③廃棄物の貯蔵と処分の手法検討
- ⑤炉内生成物推定(損傷/強度)

3) 発熱性廃棄物の処理・処分 (セメント固化を含むより合理的方向)



-発熱性廃棄物周囲の温度検討



処理場の
大きさ; 総
発熱量に
依存
(ガラス固化
の利点は小)

● 発熱性廃棄物処理・ 処分(より合理的に)

- セメント固化体性能評価
- 処分負担軽減(浅地処分)
- γ線CTでの迅速汚染評価

発熱評価(熊本高専) 処分場温度分布/容量(福島高専/JAEA)

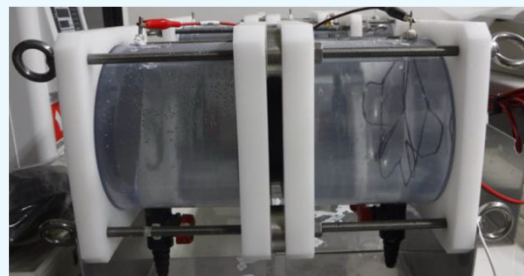
ステージ 3) - 1/3

-セメント固化体の特性(強度/拡散)

ゼオライト混合物
< 70% 強度は十分



固化体からの拡散
拡散/分配評価 → 漏洩少
セメント固化は有望



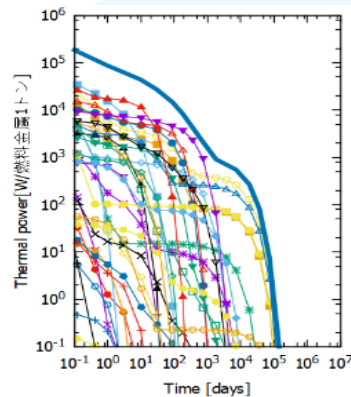
セメント固化の
閉込め能力は
期待できよう
(八戸高専、
都城高専他)

ガラス固化等のメリット小 セメント固化等が妥当

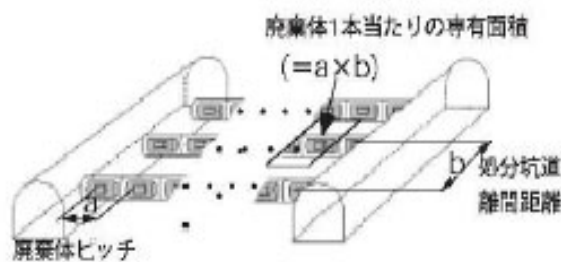
発熱量大のため中深度処分?
3半減期以上にできれば、
ピット処分も?(より合理的)

- ③ 廃棄物の貯蔵と
処分の手法検討
- ⑤ 炉内生成物推定(損傷/強度)

3) 発熱性廃棄物の処理・処分 (セメント固化を含むより合理的方向)



-発熱性廃棄物周囲の温度検討



収容体の
密度、間隔
の影響を
解析(左、
左下)

• 発熱性廃棄物処理・ 処分(より合理的に)

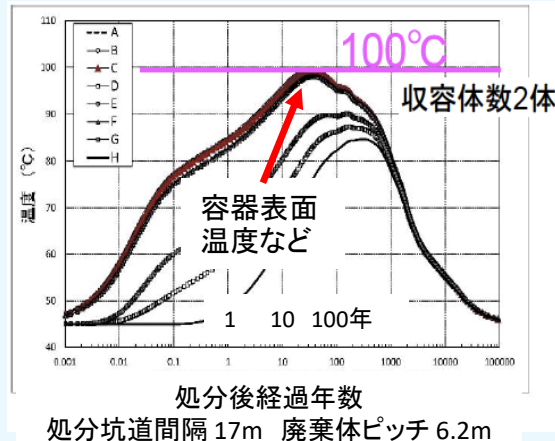
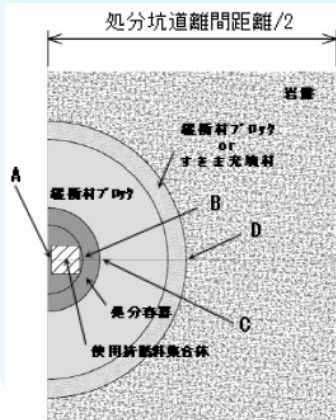
- セメント固化体性能評価
- 処分負担軽減(浅地処分)
- γ線CTでの迅速汚染評価

発熱評価(熊本高専) 処分場温度分布/容量(福島高専/JAEA)

ステージ 3) - 2/3

解析モデル
(円筒容器断面)

解析例 容器中の収容体が2本ま
でなら温度制限範囲内に留る



但し、処理場
の大きさは、主
に総発熱量に
依存
固化方法の影
響は小(セメン
ト固化は有望)

ガラス固化等のメリット小
セメント固化等が妥当

発熱量大のため中深度処分?
3半減期以上にできれば、
ピット処分も?(より合理的)

- ③廃棄物の貯蔵と
処分の手法検討
- ⑤炉内生成物推定(損傷/強度)

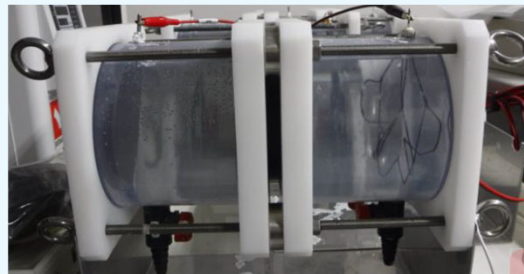
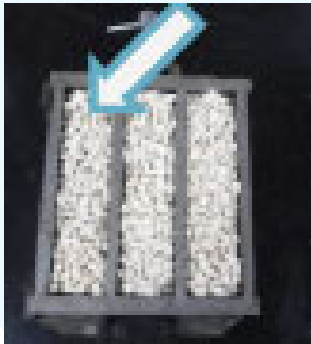
3) 発熱性廃棄物の処理・処分 (セメント固化を含むより合理的方向)

-セメント固化体の特性(強度/拡散)

ゼオライト混合物
< 70% 強度は十分

固化体からの拡散
拡散/分配評価 → 漏洩少
セメント固化は有望

セメント固化の
閉込め能力は
期待できよう
(八戸高専、
都城高専他)



● 発熱性廃棄物処理・ 処分(より合理的に)

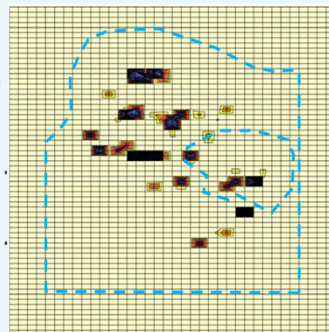
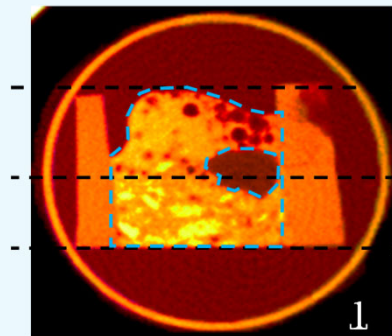
- セメント固化体性能評価
- 処分負担軽減(浅地処分)
- γ線CTでの迅速汚染評価

ガラス固化等のメリット小
セメント固化等が妥当

ステージ 3) - 3/3

-CT法での非破壊検査も検討

ガンマ線CT試料像 ^{60}Co 分布例



- ・大量に生じるコンクリート廃棄物中の汚染分布を迅速に把握し、減量に寄与(JAEA/福島高専)
- ・加熱による損傷が、核種の拡散を促進し、廃棄物量を増加させる可能性(北大の指摘)

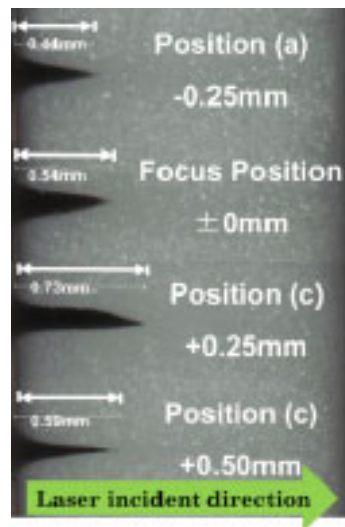
発熱量大のため中深度処分?
3半減期以上にできれば、
ピット処分も?(より合理的)

- ③ 廃棄物の貯蔵と処分の手法検討
- ⑤ 炉内生成物推定(損傷/強度)

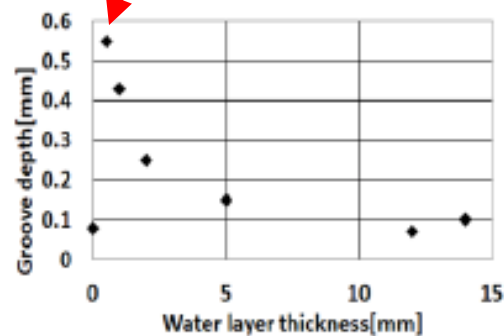
その他の成果のハイライト1

- (a) **レーザー法**(サンプリング) (長岡高専) --- 下左
デブリ等の表面の薄水層による効率の高い加工モードの指摘
- (b) **ガンマ線CT法**による放射性核種の迅速検出 (JAEA/福島高専)
北大(小崎教授)が指摘する拡散によるコンクリート中の汚染拡大の迅速評価に利用可能、処理効率の向上 --- 下右

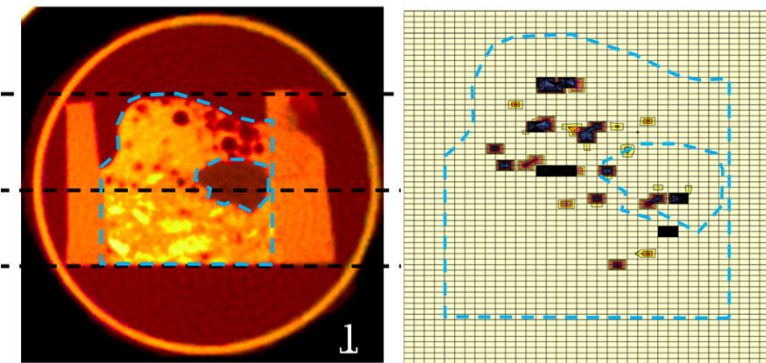
薄水層による高効率加工モード



加工量がピーク



ガンマ線CT試料像 60Co分布例



迅速にコンクリート中の汚染分布を評価できる可能性

その他の成果のハイライト2

- (c) **色彩**によるコンクリートへの**加熱温度推定**(都城高専)
薬剤による染色応答による加熱温度推定の実験的確認
- (d) **ヴァーチャルリアリティー(VR)、MR法**の利用 (旭川高専)
効果的な遠隔操作シミュレーションシステムの構築
- (e) **経済性の高いICP-MS用の前処理法**の提案(^{90}Sr 等を対象) (東大)
シクロデキストリンの適用及び高専生のホット体験教育
- (f) **作業安全向上**のための提案 (福島高専)
作業安全確保への、高次なモチベーションの重要性の指摘
承認欲求以上が重要性であることを実験的に抽出

他にも多数

まとめ (ステージ 1)-3); センシング/サンプリング、ホット試験/健全性、発熱性廃棄物)

センシング/サンプリングからデブリ採取法判定/健全性評価、より合理的な発熱性廃棄物の処理・処分にわたる技術開発を進めた

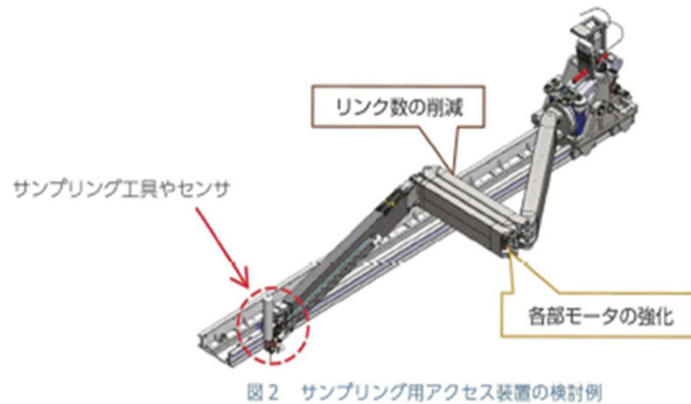
1) 炉内の核種/損傷分布評価とサンプル採取 (機器<10kg; IRIDアーム対応)
小型放射線計測、遠隔振動計 汚染、損傷の分布評価
小型遠隔放電加工装置等 セラミック/金属の同時サンプリング

2) 微小サンプルホット試験能力を拡張 → デブリ切削法/残存機器強度
ホット用のナノ硬さ試験機等 微小な試料から、デブリ切削法推定
コンクリート強度への熱影響等 硬さ、弾性率、組織から強度/健全性

3) 発熱性廃棄物の処理・処分 (セメント固化を含むより合理的方向)
発熱性廃棄物による温度上昇 ガラス固化利点小、より合理的処分
セメント固化等の閉込め能力 セメント固化の性能は低い

NDF、IRID、東電との情報交換も定期的に実施

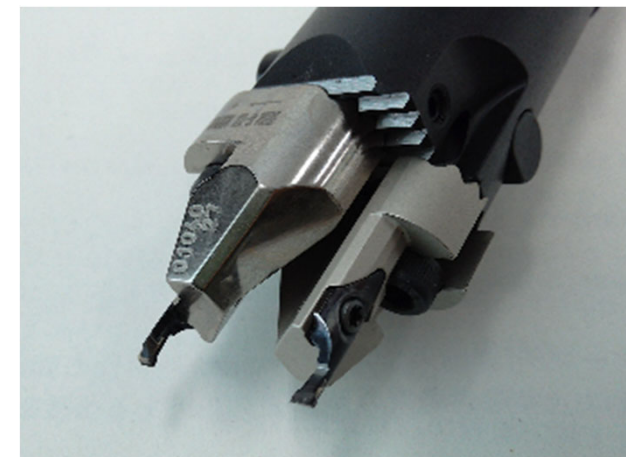
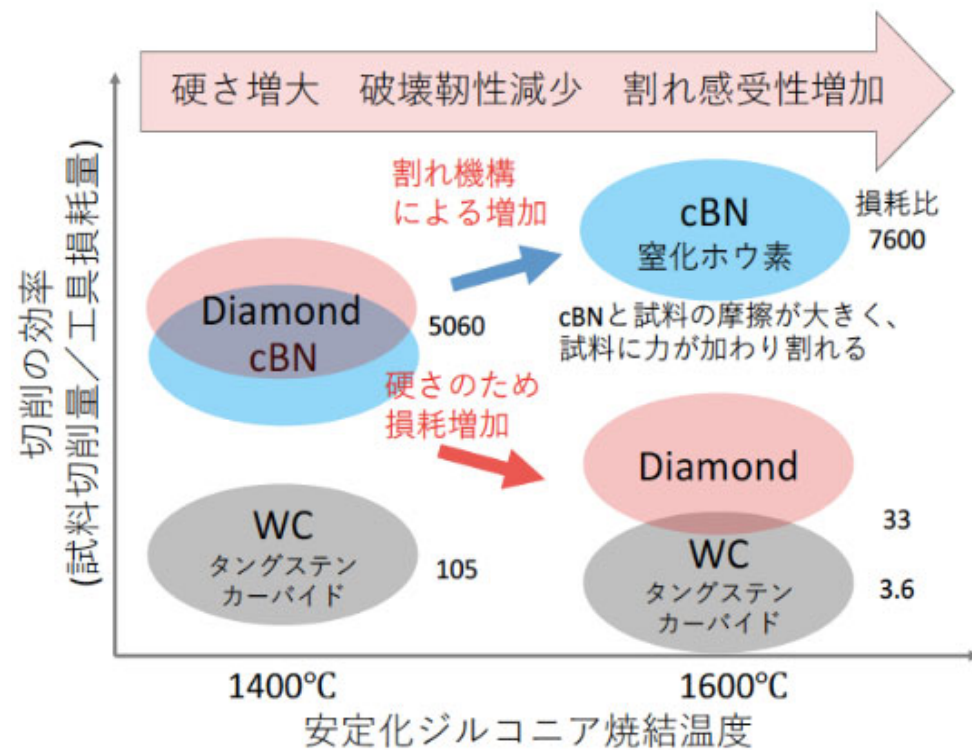
協議頂き定めた、 IRIDのアーム型遠隔操作機器の取り扱い要件など



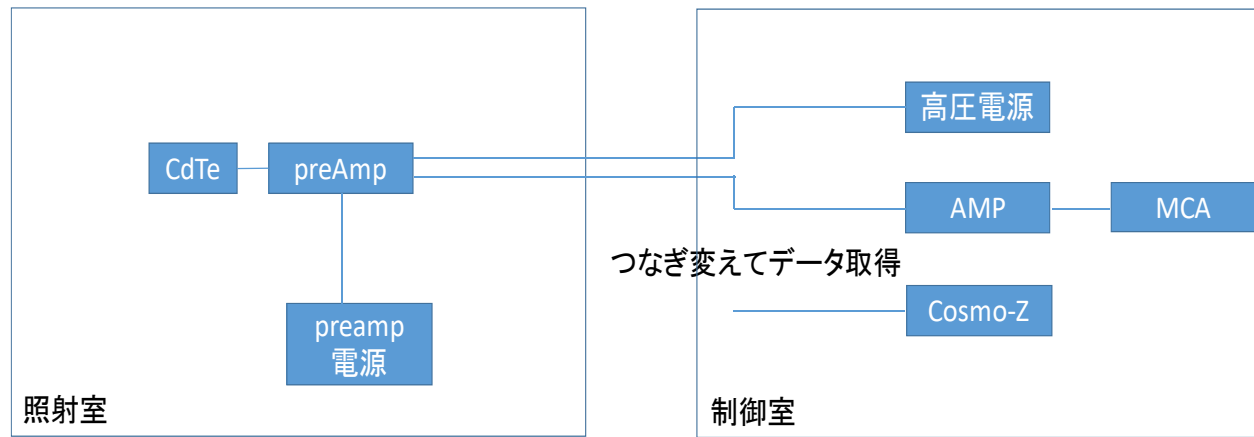
整備計画	2種類(長さが違い、剛性とペイロードが異なる) 長い方を先に導入
装着位置	X-6ペネトレーション 間口が50cmなので機器の剛性及びペイロードが限られる
長さ	それぞれ、概ね20m及び10mの機器の2種類
ペイロード	概ね、10kg(20m長さ)及び20kg(10m長さ)
ケーブル類	電力、データ、圧縮空気
装着品	長い機器: ワイヤブラシ(装置寸法15cmx15cmx50cm程度) 短い機器: グリップ、スコップ、ボーリングマシン(2本ペアドリル)
その他	サンプルング機器には、反力が小さいことが求められる ボーリングマシンの動作には、対象の硬さが重要と考える 計測項目には、3Dレーザースキャン測定も予定 装着する機器には水密性も要求される 火花を発する可能性のある装備には注意が必要(このため、ウォーター ジェット も懸念がある)

検討結果(p.18)

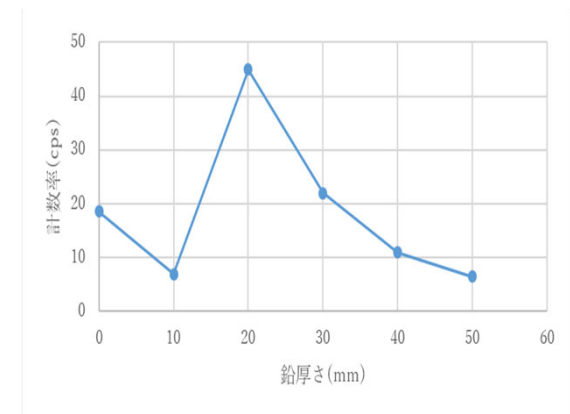
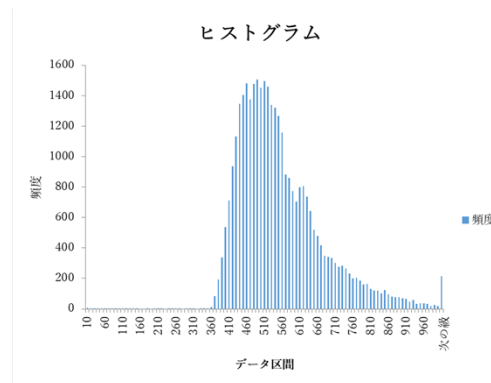
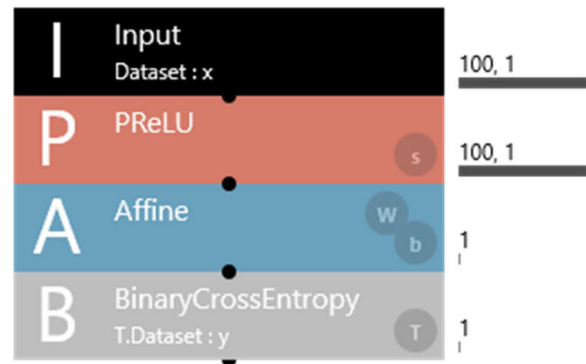
インテグレーションについての検討結果を紹介する。検討の対象機器として、産技高専の小型放電加工ヘッド(本体は10kg以内)、東京都市大学の小型放射線計測機器(遮蔽付きで8kg)などを想定する。これとIRIDのアーム型遠隔操作機器との取り合いの検討である。ペイロードに関しては、小型放電加工ヘッドも小型放射線計測機器も、適合性は確保できたと考えられる。反力については、放電加工法、レーザー法については、問題は少ないと考えられる。寸法については、小型放電加工ヘッドに関して、電力線、ビデオカメラのケーブルを含めると高さが50cm程度になるが、これも対応可能な範囲に入る。



切削試験のまとめ (タンガロイ/福島高専)

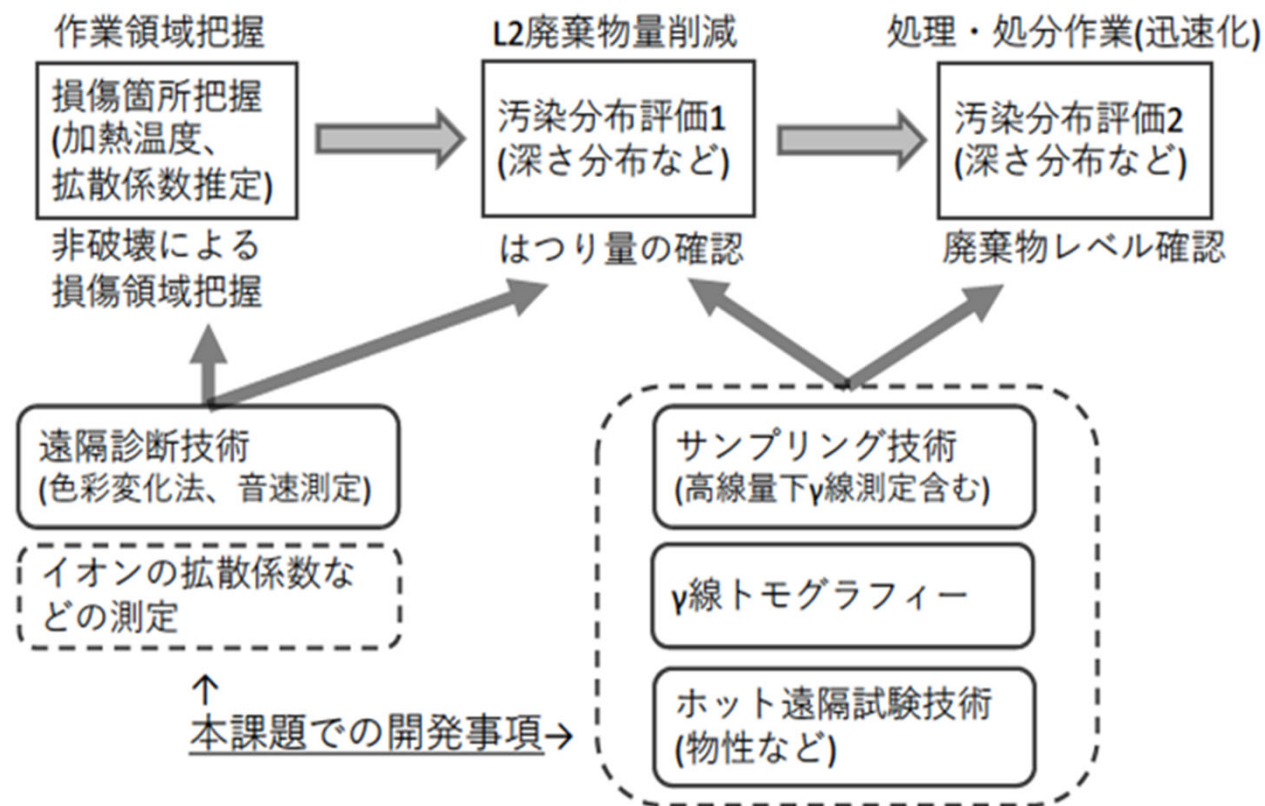


名古屋大学コバルト60照射施設での照射体系



AIによる波形の弁別 5mm角CdTe検出器を4Gy(水)/h1.33MeVのピーク

鉛遮蔽(>30mm効果的 100Gy/h)



放射性コンクリート廃棄物の減容に寄与できると考えられる開発項目

(1)研究開発課題

高専が多数参加するため、関与する教員及び学生数の確保による教育効果も期し、比較的、小規模な課題を多数設定した(大型の遠隔機器などに代えた)。

- ・以下の工学5課題及び社会科学課題(全6課題)からなり内容は多岐にわたる(研究開発課題)
- ① 炉内遠隔操作機器(サンプリング等)、②性状分析用遠隔操作機器(ホット試験法等)、③廃棄物の貯蔵と処分的手法、④性状分析手法及び遠隔操作機器の基礎技術、⑤炉内生成物推定(健全性)、⑥作業環境と研修内容の改善による作業安全性向上の可能性(社会科学課題)

(2)研究開発の内容紹介

6課題は多岐に渡る。簡単のため、廃炉過程に沿い、代表的成果をピックアップし説明する。

廃炉工程は、概ね、以下の4ステージで構成されと考えられる(サンプリング/解析/取出/処分)
(i)センシング/サンプリング(試料採取等)→(ii)ホット試験/解析(デブリ切削法、工法選択等)→
(iii)取出し工事(大型機器でのデブリ/ガレキ取出し)→(iv)廃棄物処理処分(固化、埋設等)

本プログラムでは、これら(i)~(iv)の過程のうち、大型の遠隔機器を要する(iii)取出し工事を除く、以下の3つのステージに集中した(前述の「研究開発課題」の選択方針による)。なお、センシング/サンプリング機器については、IRIDアーム(ペイロード10kg以下)への適合性も考慮。

・センシング/サンプリング(ステージ1)

何でも切れる放電加工法(レーザー法も)、小型放射線計測機器、事故時温度分布推定等

・ホット試験/解析(ステージ2)

微小試料用ホット試験機(ナノ硬さ等)、構造健全性推定(コンクリート熱劣化)等

・発熱性廃棄物の処理・処分(ステージ3)

発熱性廃棄物の温度分布、セメント固化法開発、廃棄物の負担軽減(中深度埋設回避)等

(2-1)センシング/サンプリング用の小型軽量機器の開発(ステージ1)

- ・小型放射線計測(γ 線スペクトル検出)機器(東京都市大)

高線量率下での核種分析等を実現するため、検出素子内でのパルスのオーバーラップを減少させるため、CdTe製の検出器を小型化(2mm立方)し、スペクトルの分解能を確保。分解能に影響しない範囲の遮蔽を評価し(数10Gy/hまで対応、遮蔽なしでも10Gy/h程度)、電子回路系の耐放射線性改良も実施。遮蔽を含め、重量8kg以内の小型ユニットを実現(IRIDアームにも適合)。

- ・遠隔型の小型振動計による損傷分布推定など(福島高専、JAEA)

コンクリートの弾性率分布から、事故時の加熱(温度)及び機器健全性を推定できる(後述(2-2))と考えられ、弾性率分布測定を目的とした、耐放射線製性の高い小型(重量約300g)の遠隔型振動計

を開発(弾性率測定を実証)。線量率 1kGy/h まで、振動計の動作確認(耐久性 数 100kGy)。

- ・小型放電加工式サンプリング機構開発等(都立産技高専)

加工中の伝導性皮膜形成により、セラミックスも切削できる放電加工法を開発し(基本的に全ての固体を切削可能)、放電回路、電極制御機構等を統合した、小型のサンプリング用機構を試作した(高耐放射線性電子部品で構成)。遠隔加工能力実証のため、100m 程度のケーブルを介して、金属円板切出し、コンクリート等の加工能力を実証した。軽量化も達成した(10kg 以下)。

(2-2)微小試料用ホット試験機開発及び構造材料の残存強度評価法の検討(ステージ 2)

- ・微小試料用ホット試験機器、試験法等の開発(茨城高専、都城高専)

微小試料用ホット試験機器として、寸法 0.1mm 程度の試料から硬さ、弾性率を評価する、ナノインデンテーション硬さ試験手法(炭化ホウ素粒子等に適用)、ホット試験の実現に必要な、放射性試料の遠隔調製機器を開発した。さらに、試験片体積を最小にできる小型 3 点曲げホット試験機器(広い試験温度; 液体窒素温度から 100°C)を開発し、セラミックス等の破壊靱性評価に適用。

- ・構造材料の残存強度評価(木更津高専、都城高専、福島高専)

ホット試験結果の利用手法の開発として、構造物健全性の評価法を開発(切削性推定手法も開発)。コンクリートの強度は、熱履歴で低下するが、従来から知られていた弾性率-圧縮強度関係を修正する関係を実験的に取得した。また、格納容器鋼の強度への熱履歴及び塑性変形の影響を評価し、1300°C以上の加熱(1 時間程度)や塑性変形(>5%)が破壊靱性値を大幅に低下させることを指摘。

(2-3)発熱性廃棄物の固化、処理・処分方法の負担軽減法の提案(ステージ 3)

- ・発熱評価及び安価な固化法(セメント固化)の開発(熊本高専、八戸高専、福島高専)

セシウム吸着ゼオライト(0.1%吸着を想定; キュリオン)等では、発熱が相当あり(>1kW/m³)、処分時期によっては負担増の可能性を指摘。さらに、セメント固化体(ゼオライト量<70%)を作製し、強度(温度依存性含む)、イオンの拡散等を評価し、安価な固化方法として利用可能性を指摘。

- ・合理性の高い発熱性廃棄物の処理・処分の検討(八戸高専、都城高専、福島高専、JAEA)

固化方法の比較の点では、処理場の大きさは、全発熱量と熱的な境界条件(地盤の温度等)で決まるため、耐熱性の高いガラス固化は利点が少ない。一方、早期の処分では、負担が増える可能性がある(中深度処分)、3 半減期程度の冷却後に、セメント固化(80°C程度まで利用可)などの安価な方法による、負担が少なくなる処理・処分法(より浅い位置に)を検討する余地がある。

その他の成果の例

- ・サンプリング等: レーザー法で、薄水層による 1 桁以上の効率化モード発生を指摘(長岡高専)。

機械切削工具も開発。コンクリート表面の色彩分布からの事故時温度の推定法(都城高専)。

- ・ホット試験機器等: ヴァーチャルリアリティ(VR)の利用による、効率的な遠隔操作シミュレーションシステム構築(旭川高専)。ICP/MS 前処理法に安価なシクロデキストリン適用(東大)。

- ・廃棄物の処理・処分: γ線 CT 法による大きなコンクリート塊中の核種位置の迅速検出法(拡散

によるコンクリート中汚染拡大の迅速評価に利用可 --- 北大の指摘への対応法)(JAEA)。

・作業安全の向上:作業安全確保への高次のモチベーション(承認欲求等)の重要性指摘(福島高専、奈良高専など)