

東北大学災害復興新生研究機構シンポジウム
平成30年2月2日



安全・安心な社会実現のために： 福島第一原子力発電所 廃炉への貢献

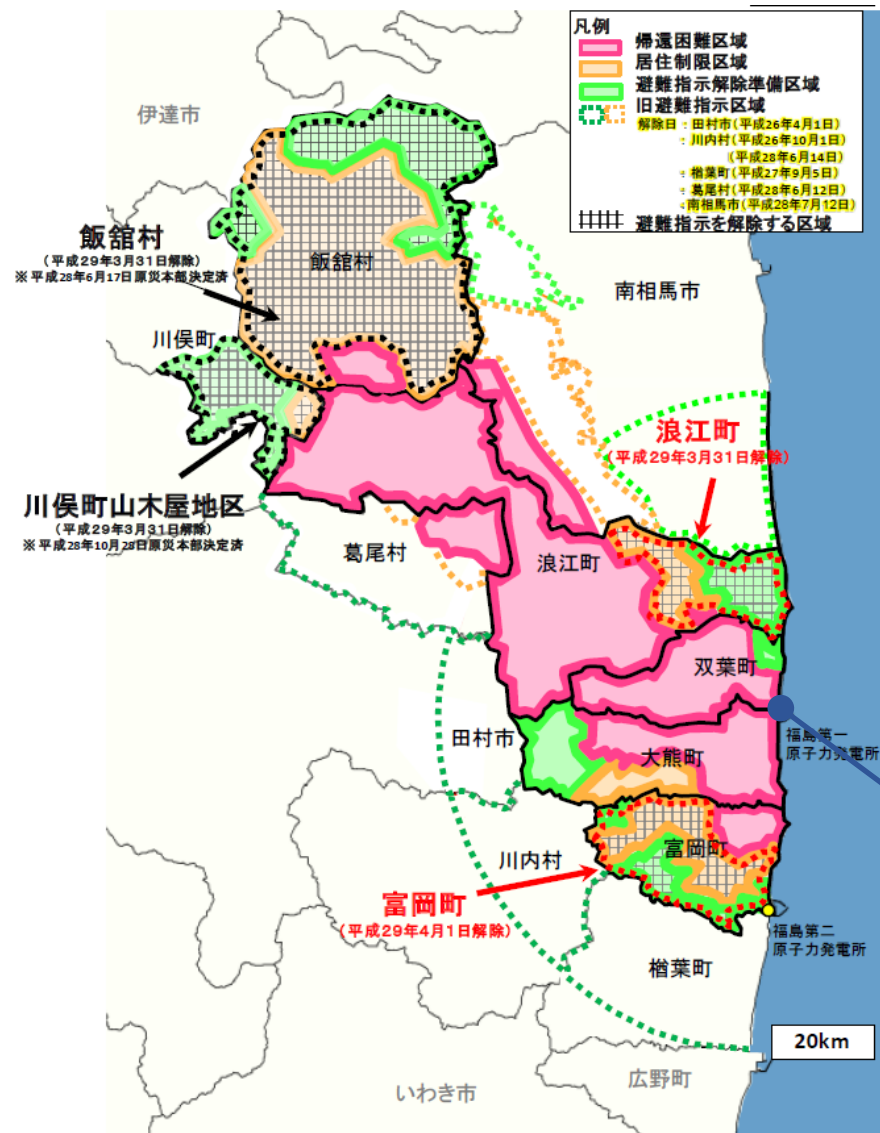
事故炉廃止措置・環境修復プロジェクト



原子炉廃止措置基盤研究センター長

渡邊 豊

東北大学 事故炉廃止措置・環境修復プロジェクト



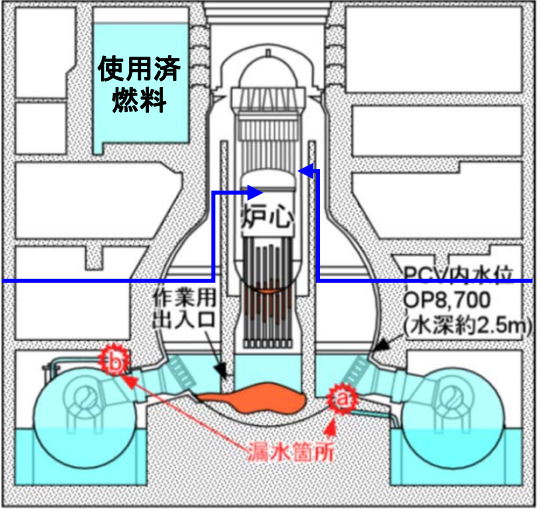
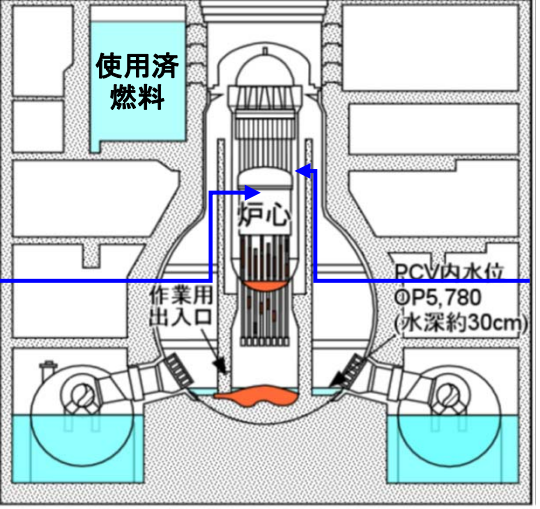
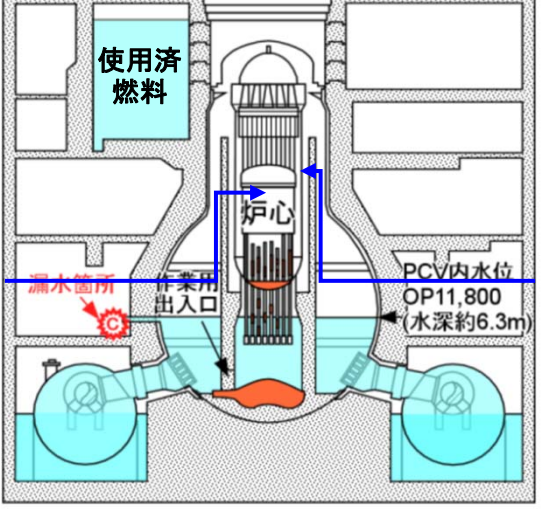
オフサイトの環境修復への貢献

- 放射性物質によって汚染された生活環境の復旧技術の開発
- 被災動物の包括的線量評価事業

事故炉の安全・着実な廃止措置への貢献

- 原子炉廃止措置基盤研究センターを中心とした基盤研究・人材育成

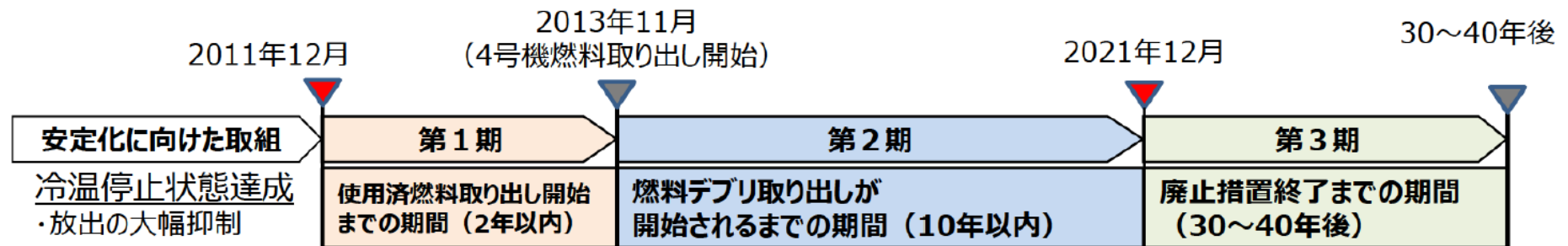
現在の福島第一プラント状況¹⁾（一部推定）

1号機	2号機	3号機
		
約5～10 Sv/h	約31～73 Sv/h	約0.75～1 Sv/h

1) NDF: 1Fの廃炉のための技術戦略プラン2016.

国が示す福島第一廃炉の目標工程

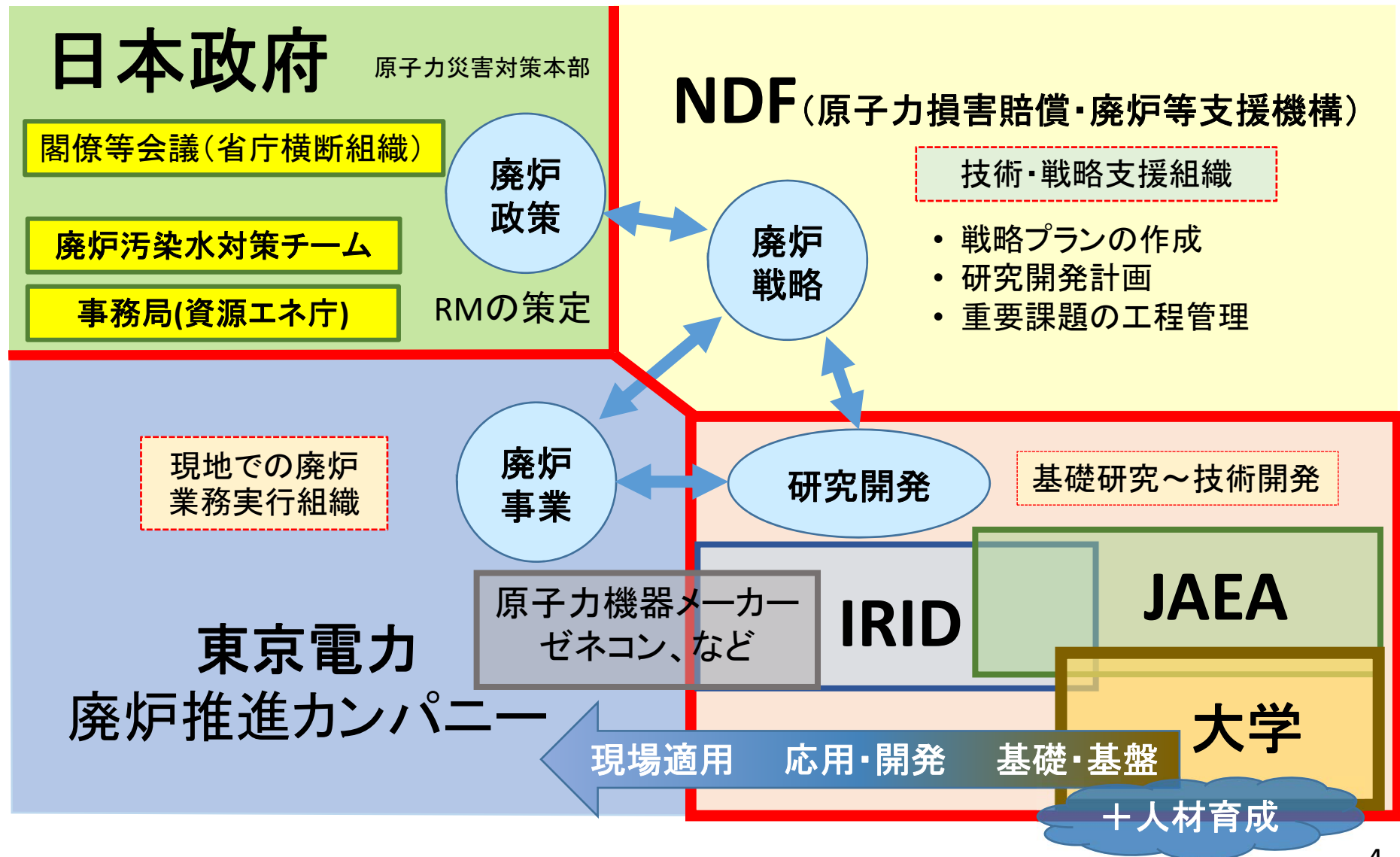
廃炉・汚染水対策チーム事務局



対策の進捗状況を分かりやすく示す目標工程

汚染水対策	汚染水発生量を150m ³ /日程度に抑制	2020年内
	浄化設備等により浄化処理した水の貯水を全て溶接型タンクで実施	2018年度
	① 1, 2号機間及び3, 4号機間の連通部の切り離し	2018年内
滞留水処理	② 建屋内滞留水中の放射性物質の量を2014年度末の1/10程度まで減少	2018年度
	③ 建屋内滞留水処理完了	2020年内
燃料取り出し	① 1号機燃料取り出しの開始	2023年度目処
	② 2号機燃料取り出しの開始	2023年度目処
	③ 3号機燃料取り出しの開始	2018年度中頃
燃料デブリ 取り出し	① 初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定	2019年度
	② 初号機の燃料デブリ取り出しの開始	2021年内
廃棄物対策	処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見通し	2021年度頃

福島第一廃炉に関する役割分担



事故炉廃止措置に関わる東北大学の活動年表

年	月	主な事項
2011	3	東北地方太平洋沖地震ならびに福島第一原子力発電所事故発生
2012	8	総長 福島第一原子力発電所現地視察
2013	8	東北大学グローバルビジョンに福島第一発電所廃炉プロジェクトを宣言
2014	3	日本原子力研究開発機構(JAEA)との包括連携協定締結
	10	「文部科学省 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」事業開始
2015	3	第一回「次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス」開催(東北大学青葉山キャンパス)
	10	学生による福島第一原子力発電所廃炉作業見学(第一回)
2016	12	「東北大学 <u>原子炉廃止措置基盤研究センター</u> 」設置 
2017	11	「文部科学省 廃炉加速化研究プログラム(日仏原子力共同研究)」事業開始
	11	Fukushima Research Conference on “Corrosion Prediction and Mitigation for Key Components of Fukushima Daiichi NPS”開催(福島県富岡町)
	12	原子炉廃止措置基盤研究センター1周年記念シンポジウム開催

福島第一原子力発電所廃炉への貢献を決意した日

【現地視察】

2012年8月27日

里見 進 総長

原 信義 理事(震災復興推進担当)

青木孝文 副学長(広報・社会連携・情報基盤担当)

渡邊 豊 教授(工学研究科)



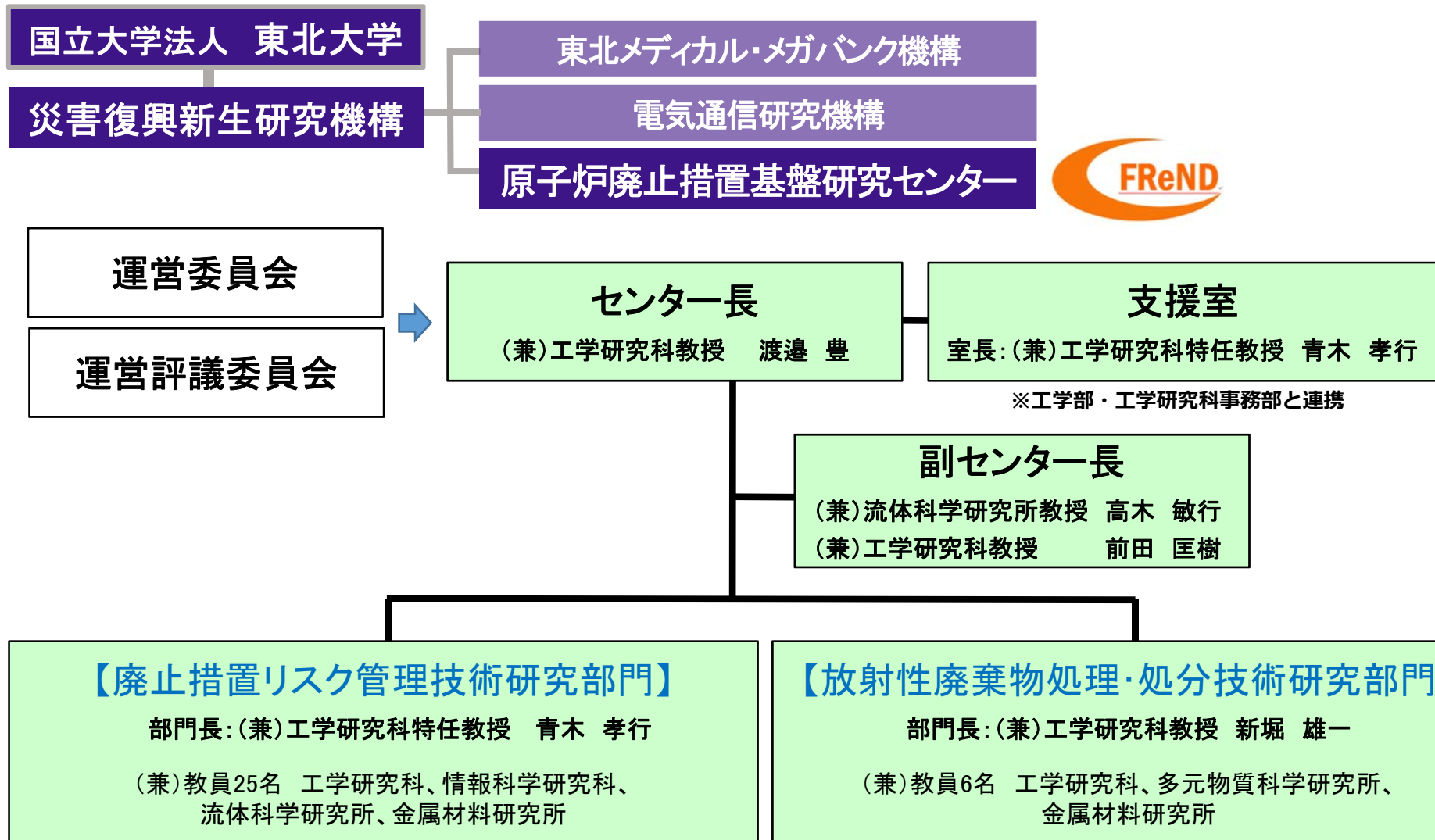
4号機原子炉建屋を南側から望む

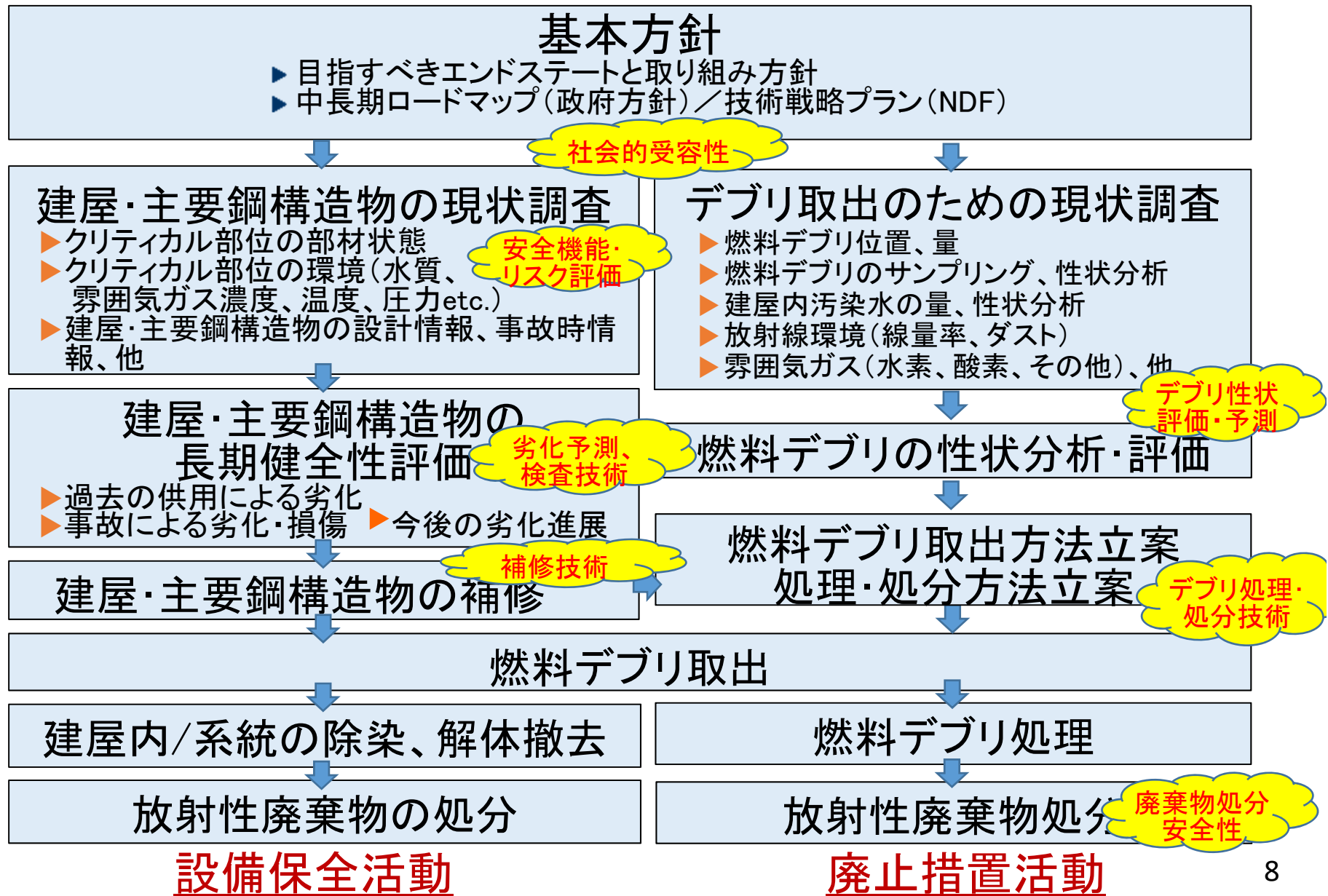


原子炉廃止措置基盤研究センター

CFReND : Center for Fundamental Research on Nuclear Decommissioning

2016.12～





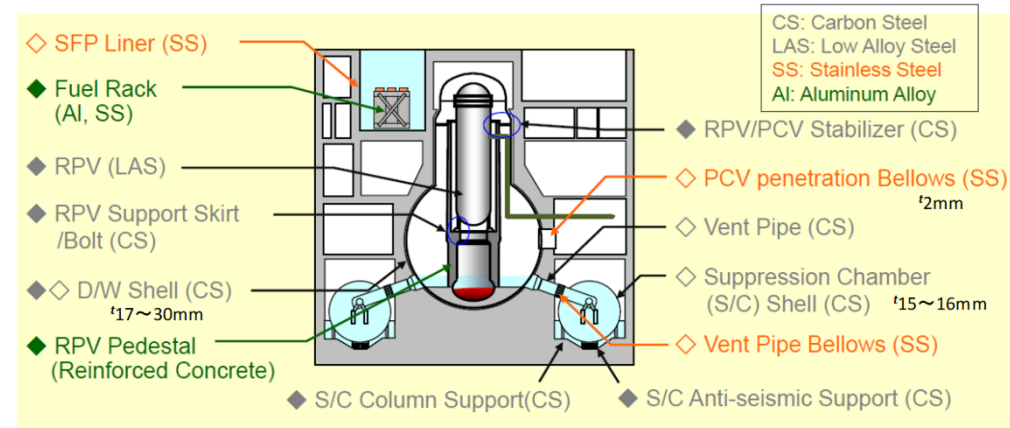
CFReND専門分野グループ

＜腐食対策・リスク評価＞ 工学研究科:教授3、特任教授2、講師1、助教1
金属材料研究所:教授1



渡邊 豊

(工:量子エネルギー工学)



Kumagai and Fukaya, 2016 Maintenance Science Summer School

＜コンクリート構造物評価＞ 工学研究科:教授2、准教授2、助教3



前田 匡樹

(工:都市・建築学)

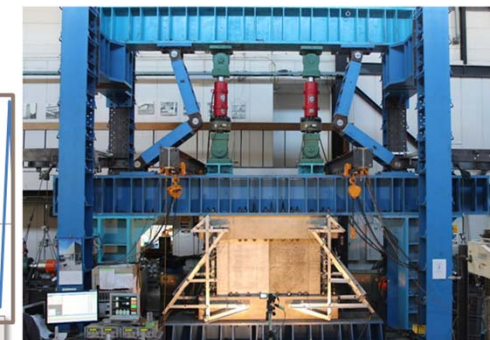
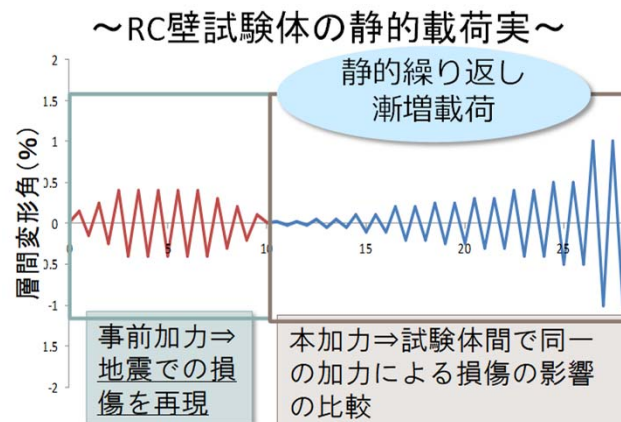


写真 加力装置

<非破壊検査技術>

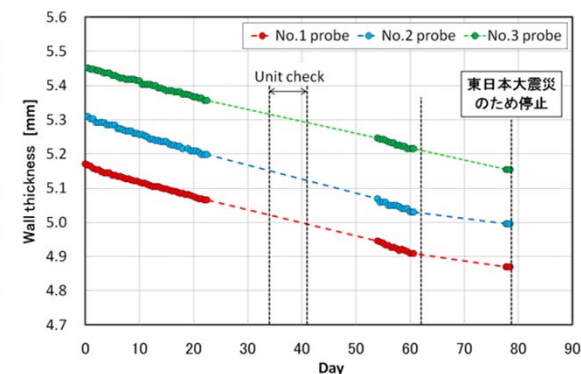


高木 敏行
(流体科学研究所)

流体科学研究所:教授2、准教授
工学研究科:教授1、准教授1
情報科学研究科:助教1



On-line monitoring
of wall thinning



<補修技術>



小川 和洋
(工:先端材料強度科学研究センター)

工学研究科:教授2、助教2
情報科学研究科:助教1

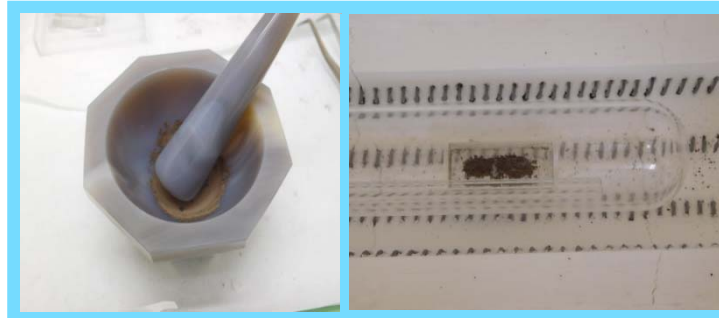
	150 rpm	200 rpm	250 rpm	300 rpm
FSW				
水中 FSW				

<デブリ性状評価>

多元物質科学研究所:教授1



佐藤 修彰
(多元物質科学研究所)

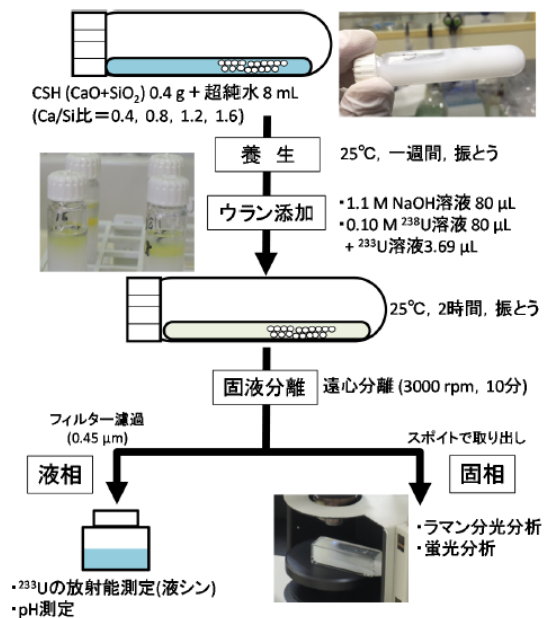
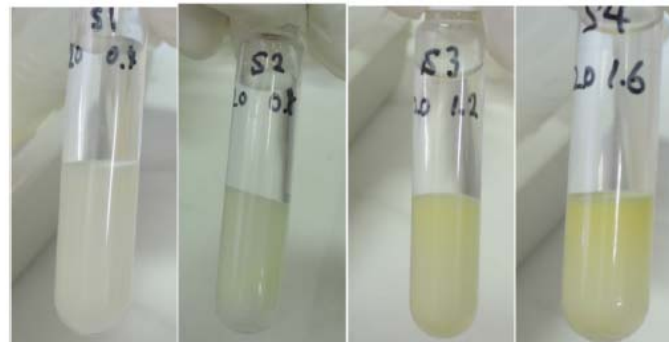


<廃棄物処分技術>

工学研究科:教授1、講師1
金属材料研究所:准教授1



新堀 雄一
(工:量子エネルギー工学)



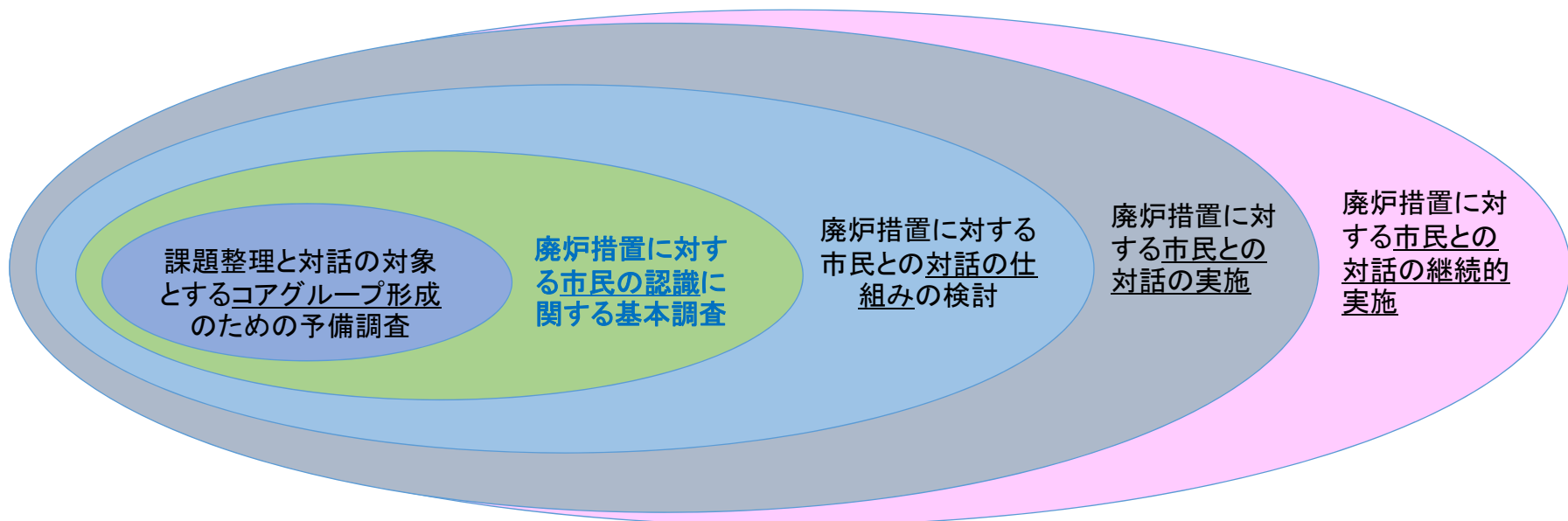
＜社会的受容性＞



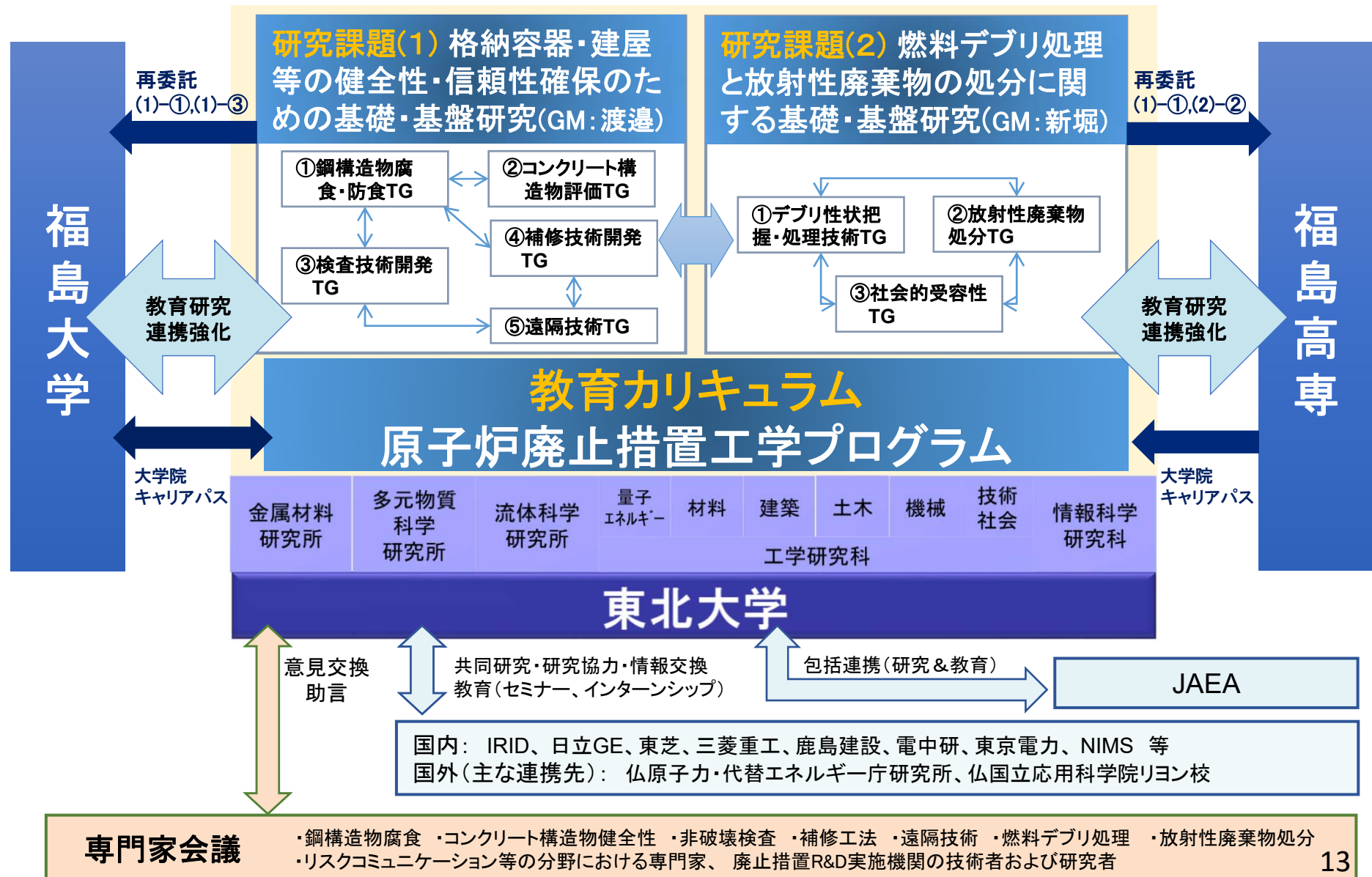
高橋 信
(工:技術社会システム)

市民との対話に基づく

- 「事故炉廃止措置」に関する市民のリスク認知傾向の解明
- 社会的受容性醸成の実践



廃止措置のための格納容器・建屋等信頼性維持と廃棄物処理・処分に関する基盤研究および中核人材育成(2014-2018年度)





基盤研究から 幾つかのトピックの紹介

デブリ性状把握・処理技術

燃料デブリの性状把握と放射性核種の溶出挙動評価

→ 廃止措置および放射性廃棄物処理・処分検討に不可欠

燃料デブリの生成と冷却水との接触（熱膨張，熱収縮の繰り返し）

→ FP(核分裂生成物)およびU/TRUが溶解・微粒子等の生成

→ 固体汚染物および汚染水の発生、処理・処分が必要

燃料デブリ調製

- ・被覆管、鋼材
- ・制御材
- ・コンクリート材



相関係評価

- ・高温X線回折
- ・温度、雰囲気
- ・組成、濃度



溶出実験

- ・核種、濃度
- ・放射能測定
- ・海水、真水



溶出挙動評価

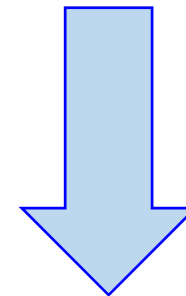
- ・溶出率
- ・溶出形態
- ・汚染状態



アクチノイド・FPトレーサー添加、
U-Zr-Ca-Si-O模擬燃料デブリ



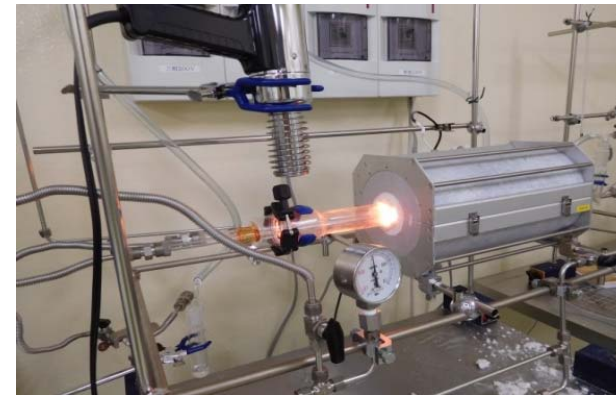
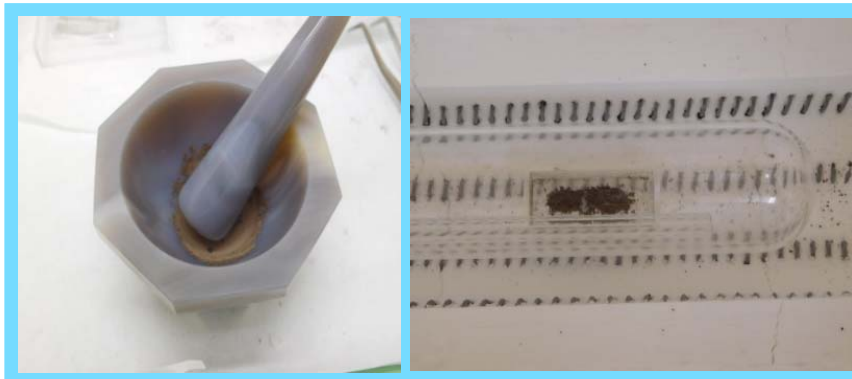
模擬デブリを海水に浸漬し、振とう



燃料デブリの相状態と放射性核種の溶出率・形態

ウラン-ジルコニウム-コンクリート系の相関係の把握 (結果の一例)

燃料＋被覆管＋セメント系について、還元雰囲気下での高温反応による生成物を評価。 UO_2 、 ZrO_2 、セメント成分(CaO と SiO_2)を還元雰囲気下で高温加熱処理($1200\text{--}1600^\circ\text{C}$)し、相関係を調査。



- $\text{UO}_2\text{--CaO}$ 系:
1300～1400℃で、 UO_2 と CaO が一部反応
- $\text{UO}_2\text{--CaO--SiO}_2$ 系:
1600℃でセメント系材料によるウランの溶融固化が起こる。

- $\text{UO}_2\text{--ZrO}_2\text{--CaO}$ 系:
1600℃で $(\text{U/Zr})\text{O}_2$ 固溶体生成
- $\text{UO}_2\text{--ZrO}_2\text{--CaO--SiO}_2$ 系:
1500℃以上で $(\text{U/Zr})\text{O}_2$ 固溶体生成、また、セメント系材料によるウランの溶融固化が起こる。

還元雰囲気、1600℃以下の条件では、 UO_2 は被覆管中のZrと反応し固溶体を形成する。また、セメント系材料がウランと溶融固化すると考えられる。

放射性廃棄物処分研究

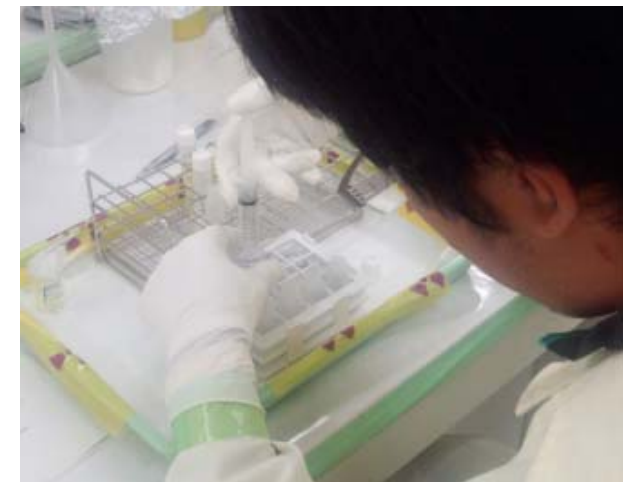
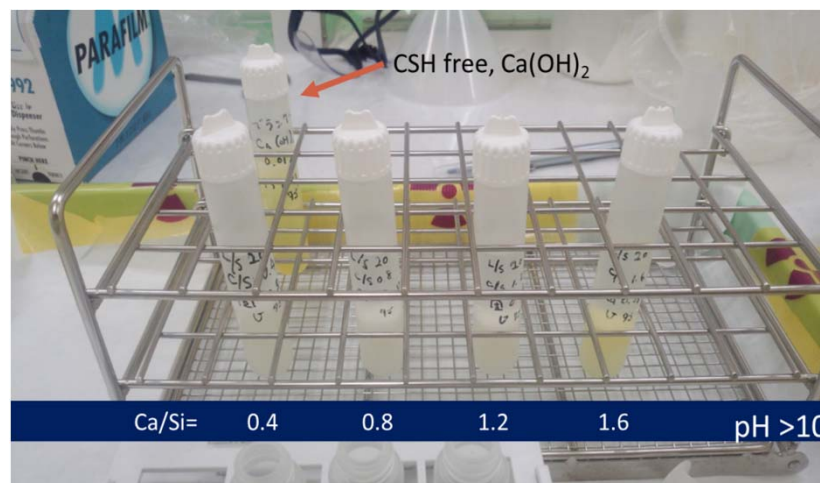
冠水環境におけるセメント系材料とウランとの相互作用の解明

→ 閉じ込め性向上を目指した処分システムの提示

- ・ 燃料デブリと格納容器内セメント系材料との接触
- ・ デブリ燃料等の処分坑道の維持に多量のセメントが必要

・ ウラン核種と劣化したセメント系材料との収着分配係数の評価

・ 収着の安定性とそのメカニズムの解明

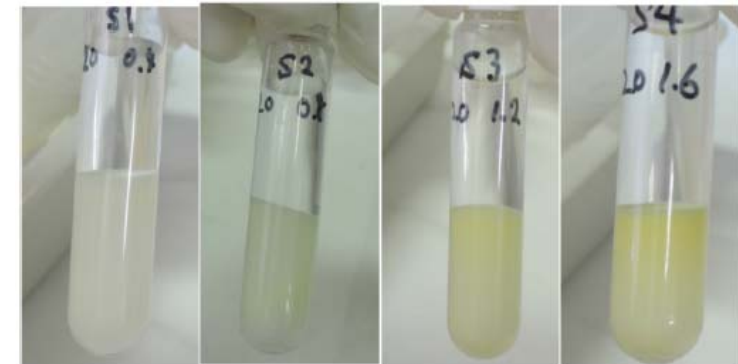
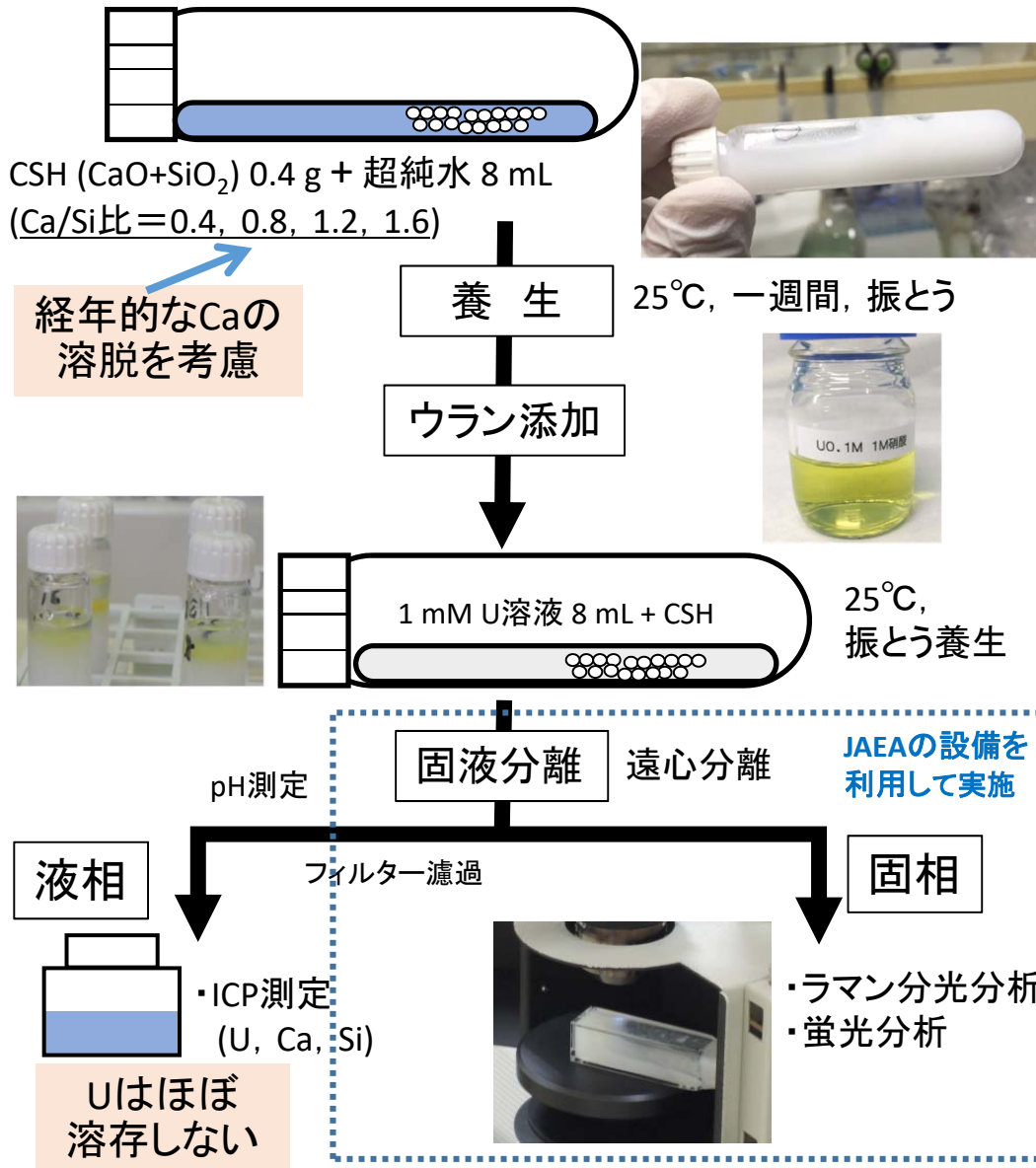


最終目標：閉じ込め性の向上を目指した処分システムの
提示と処分システムに関する安全評価への寄与

地下冠水環境におけるセメント成分－ウラン相互作用

(実験概要と結果の一例)

セメント系材料の主成分であるカルシウムシリケート水和物(CSH)とウラン(VI)との相互作用



Ca/Si比 = 0.4 Ca/Si比 = 0.8 Ca/Si比 = 1.2 Ca/Si比 = 1.6

＜ウラン添加から2時間後のCSH試料＞
Ca/Si比によって固相の色が変化。
→収着機構が異なる可能性を示唆。

・いずれのCa/Si比においても
ウランはほとんど溶存しない。

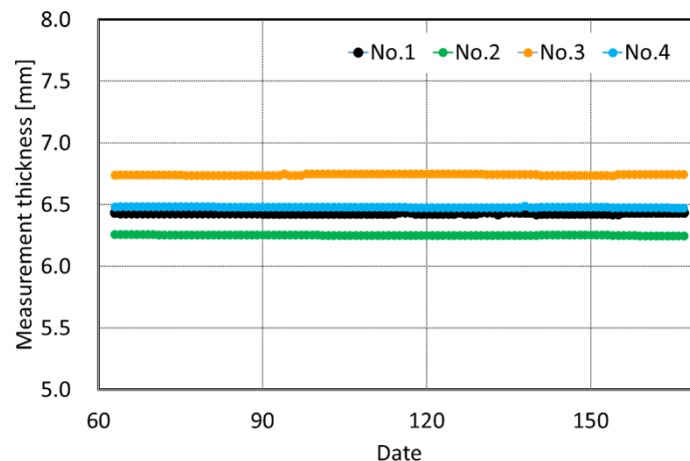
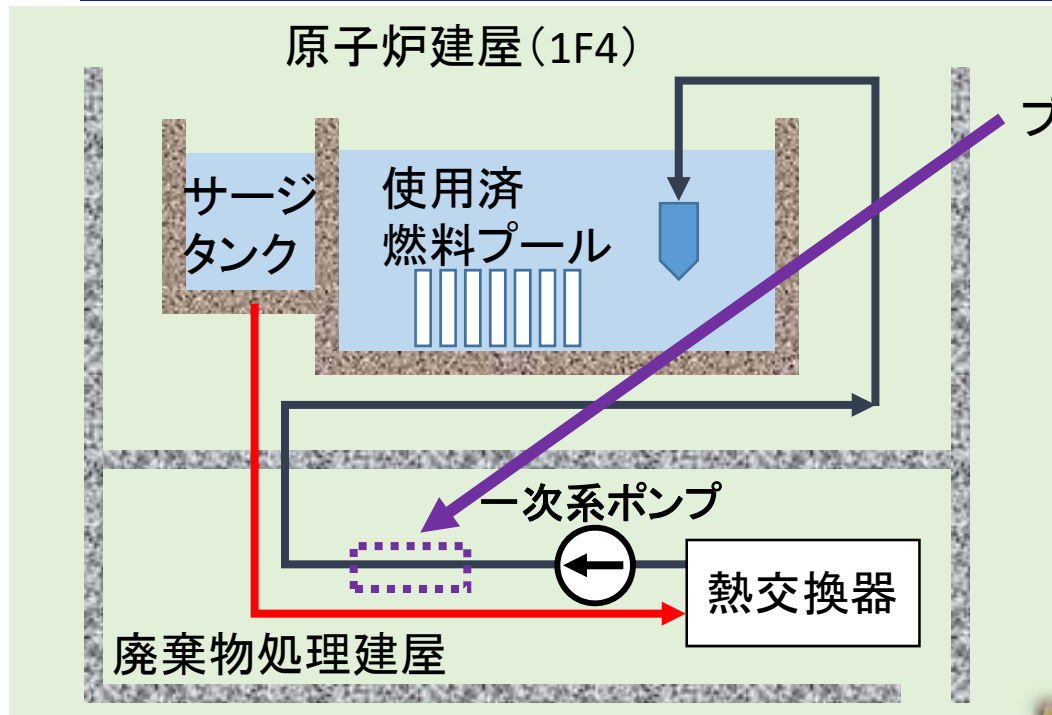


- ウランは固相側に存在
- 変質によりCaが溶脱した後も、U(VI)の高い収着性を維持



- ウランが長期間にわたりセメントにより固定化される可能性

電磁超音波を用いた減肉モニタリングシステムの福島第一原子力発電所4号機使用済燃料プール冷却配管への適用*



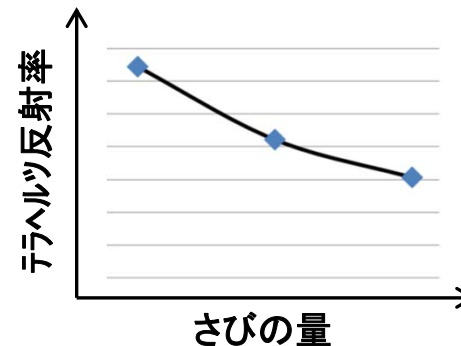
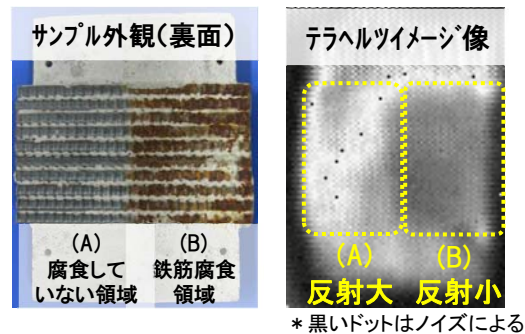
* 高木(東北大学)、鈴木(東京電力)ほか、日本保全学会第14回学術講演会(2017年8月4日) 19

テラヘルツレーザ光源による分光・イメージングの検査活用研究

① コンクリート内の鉄筋状態について、テラヘルツ波による非破壊検査

(使用周波数: 30 GHz、かぶり厚: 約30 mm)

各腐食レベルにおけるテラヘルツ反射特性を調査

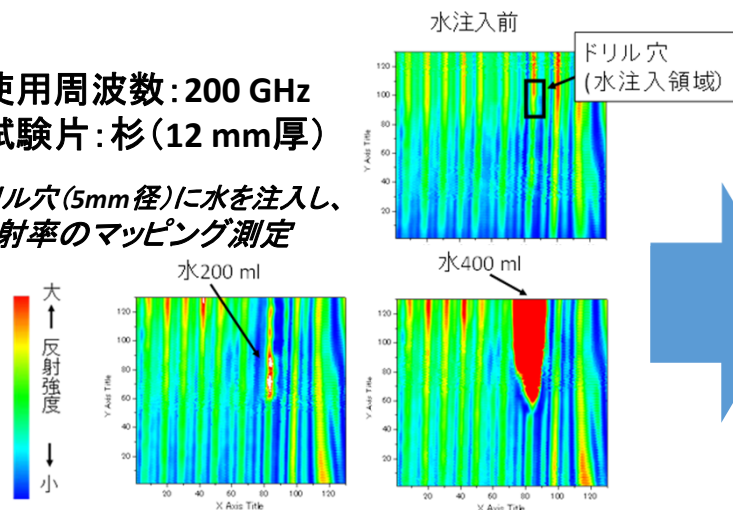


さびが進行すると、さびによる吸収増によるテラヘルツ反射率低下を示唆
→原子炉建屋の健全性評価

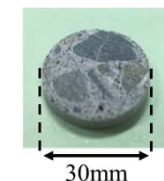
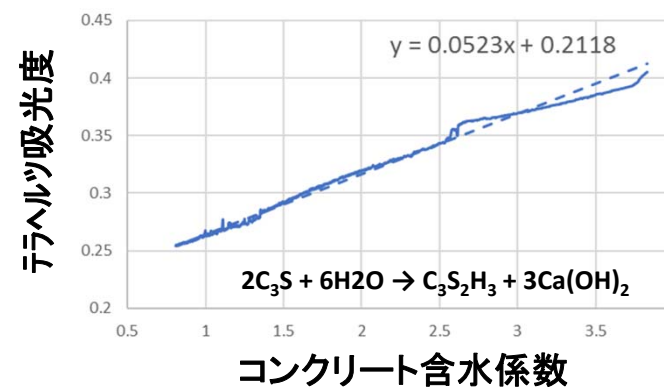
② コンクリートひび割れ部内の水の浸潤をテラヘルツにより非接触診断

- ・使用周波数: 200 GHz
- ・試験片: 杉(12 mm厚)

ドリル穴(5mm径)に水を注入し、反射率のマッピング測定



き裂ネットワーク形成、コンクリート含水率を推定できる
(コンクリート構造物評価チームとの連携)



測定コンクリートサンプルの外観

③ テラヘルツ導波路の開発

リブ／フォトニック導波路製作の要素技術を確立(右図: フォトニック型)

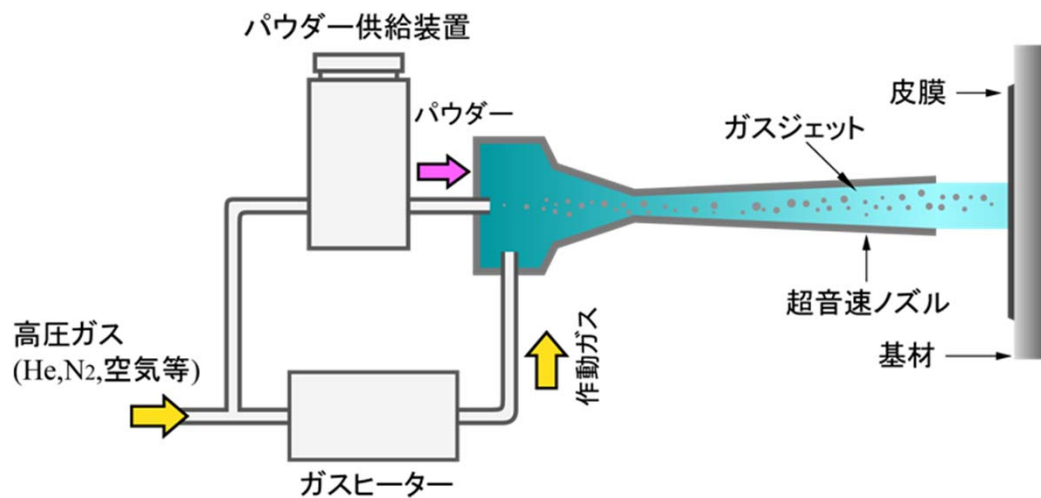


構造物補修技術開発(コールドスプレイ)

損傷した格納容器等の補修・補強, 局所的な穴あき部の封止, γ 線遮蔽などのための新規施工技術の開発 <補修のための技術的選択肢の拡大>

<コールドスプレイ(CS)>

- 粒子を固相のまま吹き付けて成膜する技術
粒子温度: 100-200°C (ガス温度 600°C 前後)
- 火炎, 火花等の発生無し (防爆上有利)
- 欠陥補修あるいは放射線遮蔽への応用
鋼 Pb+W



コールドスプレイで成長させた銅塊を機械加工してフランジを製作した例

構造物補修技術開発(摩擦攪拌接合)

格納容器等の補修溶接 → 構造強度の確保、**バウンダリ機能**の修繕

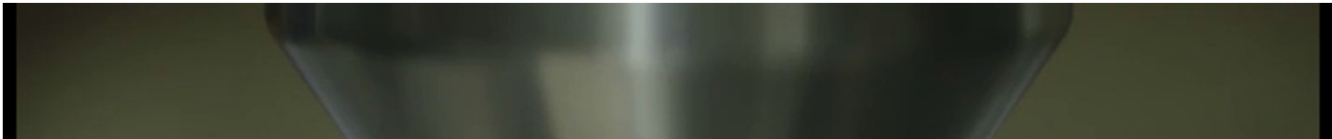
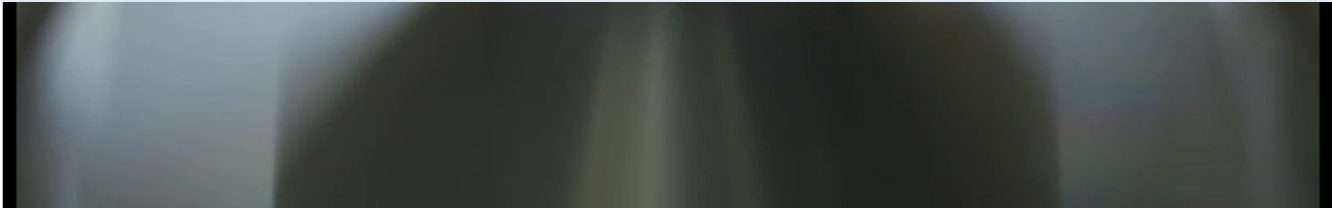
1F補修に特有の困難さ

- 腐食生成物・泥に覆われた表面
- 水中での欠陥封止
- 極めて高い空間線量率

→ 溶融溶接は不向き

→ 近接作業の回避 or 最小化

摩擦攪拌接合(FSW)の活用

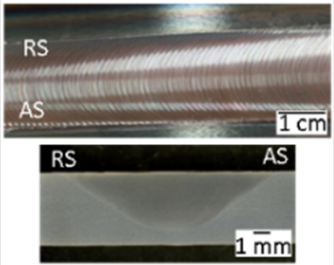
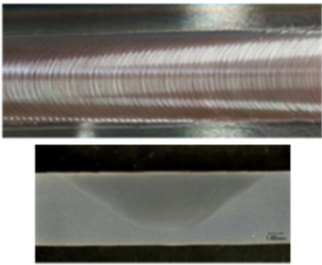
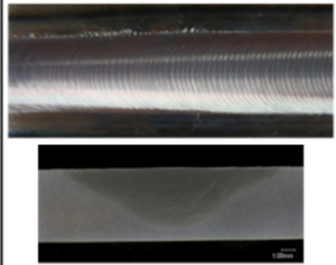
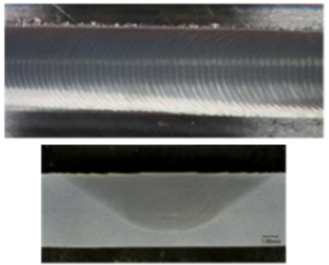
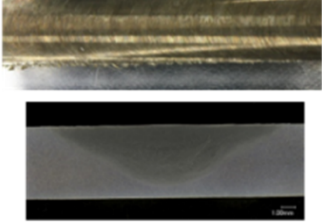
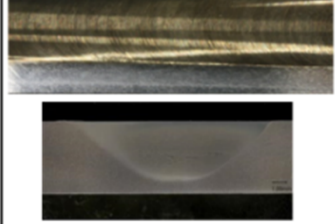
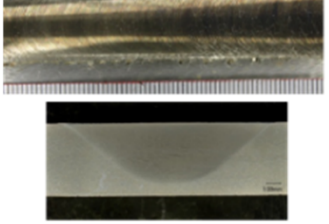
- 
- ✓ 非消耗接合ツールの回転による固相攪拌を用いて構造材料を高品位に接合可能な技術
 - ✓ 接合面の下処理を省略したシングル・ステップでの接合・補修の可能性
- 

構造物補修技術開発(摩擦撈拌接合)

事故炉格納容器等の補修溶接への展開に向けた技術開発

- ① 鋼のFSWを行うための接合ツール材の開発
- ② 水中施工性 → 接合因子解明と継手特性評価 → 接合条件適正化
- ③ 錆付いた表面での施工 → 適用可能性の実証と健全性評価
- ④ 腐食生成物等に覆われた表面 → 適用可能性の実証と健全性評価

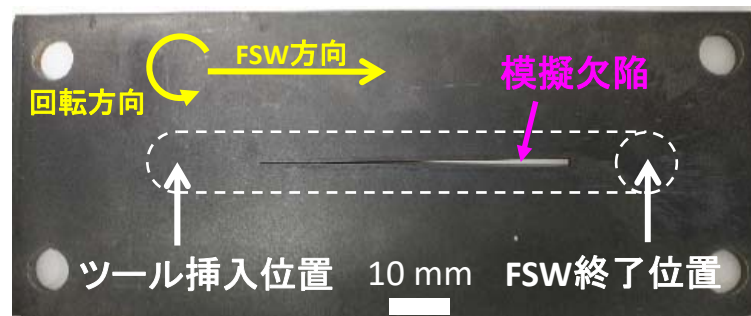
水中FSW技術の実証

	150 rpm	200 rpm	250 rpm	300 rpm
FSW				
水中 FSW				

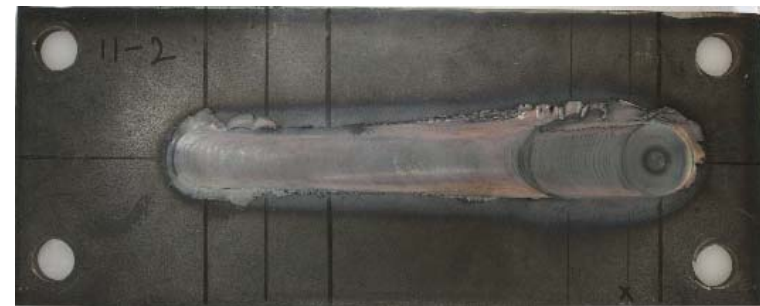
構造物補修技術開発(摩擦攪拌接合)

- ① 鋼のFSWを行うための接合ツール材の開発
- ② 水中施工性 → 接合因子解明と継手特性評価 → 接合条件適正化
- ③ 錆付いた表面での施工 → 適用可能性の実証と健全性評価
- ④ 腐食生成物等に覆われた表面 → 適用可能性の実証と健全性評価
- ⑤ 幅のある欠陥の封止補修
- ⑥ 異材継手の補修

欠陥を有する錆びたフェライト鋼の摩擦攪拌接合



FSW
(定荷重)



適用先可能性

- 使用済み燃料プールのライナーの補修
ステンレス鋼製ライナーの欠陥部をクラッド除去なしで水中補修
- 格納容器の補修

鉄筋コンクリート(RC)構造物評価技術

実施方針(ターゲット)

福島第一原子力発電所の廃炉が完了するまでのコンクリート構造物の**要求機能維持に対する構造的健全性**

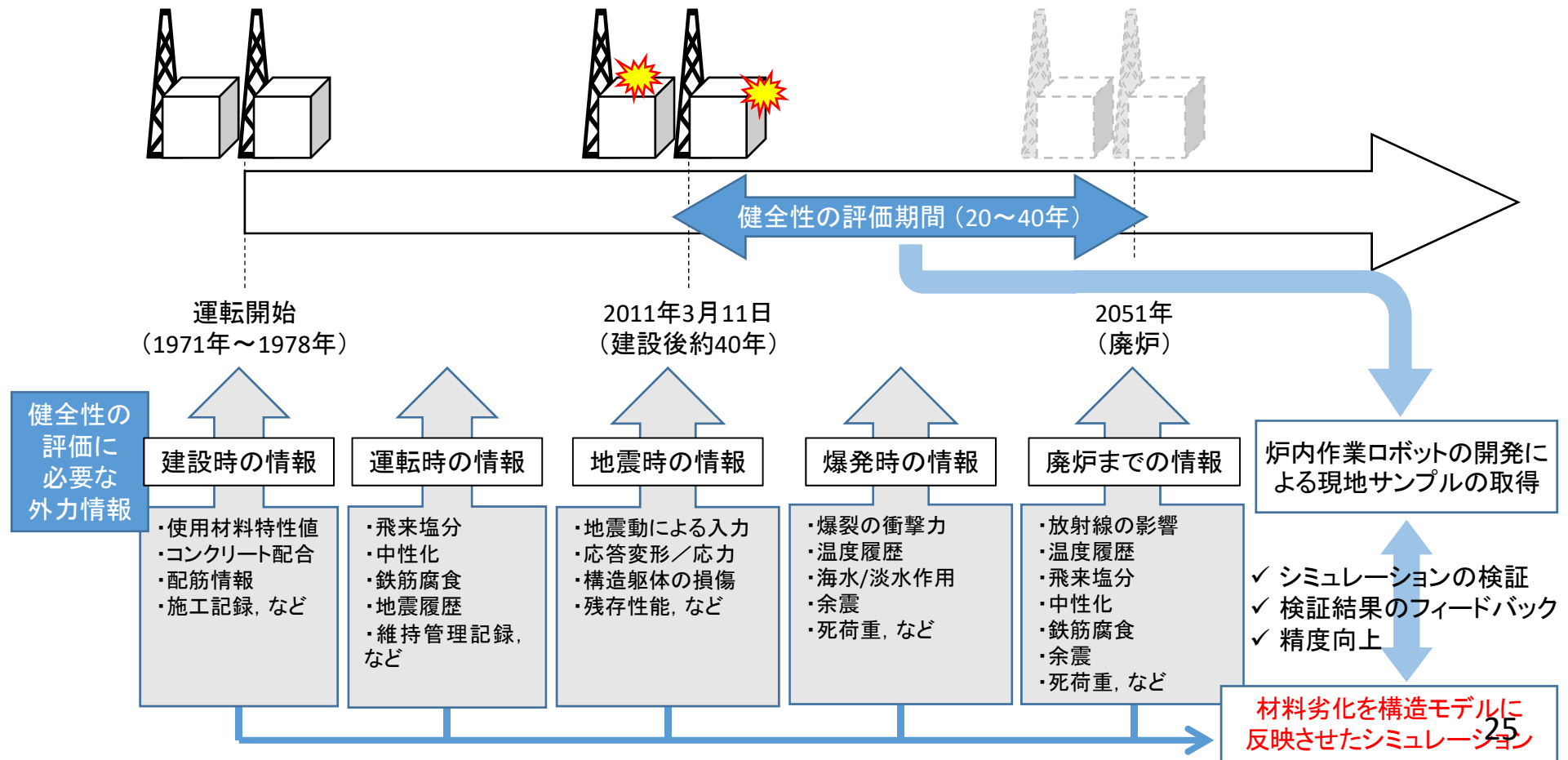
- ✓ 将来の健全性予測も含めた精密な評価手法
- ✓ 必要に応じた補修／補強の要否判定手法

要求機能

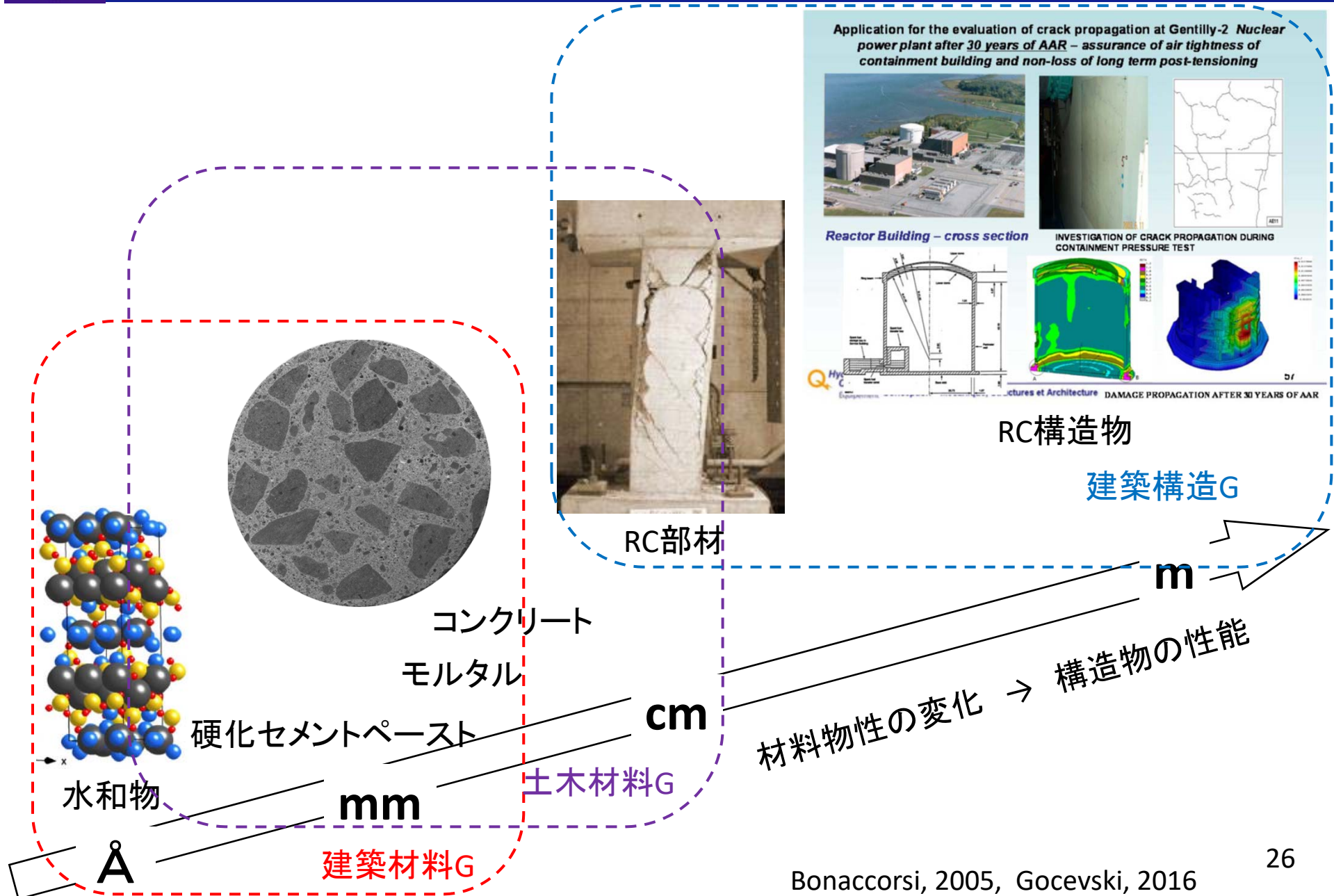
- ①安定冷却, ②放射性物質の封じ込め

健全性評価の対象期間における想定外力

- ①大規模な余震, ②格納容器への冠水



RC構造物の評価研究(素材～構造まで)



RC造耐震壁の静的載荷実験による損傷と性能劣化の評価

～RC壁試験体の静的載荷実験～

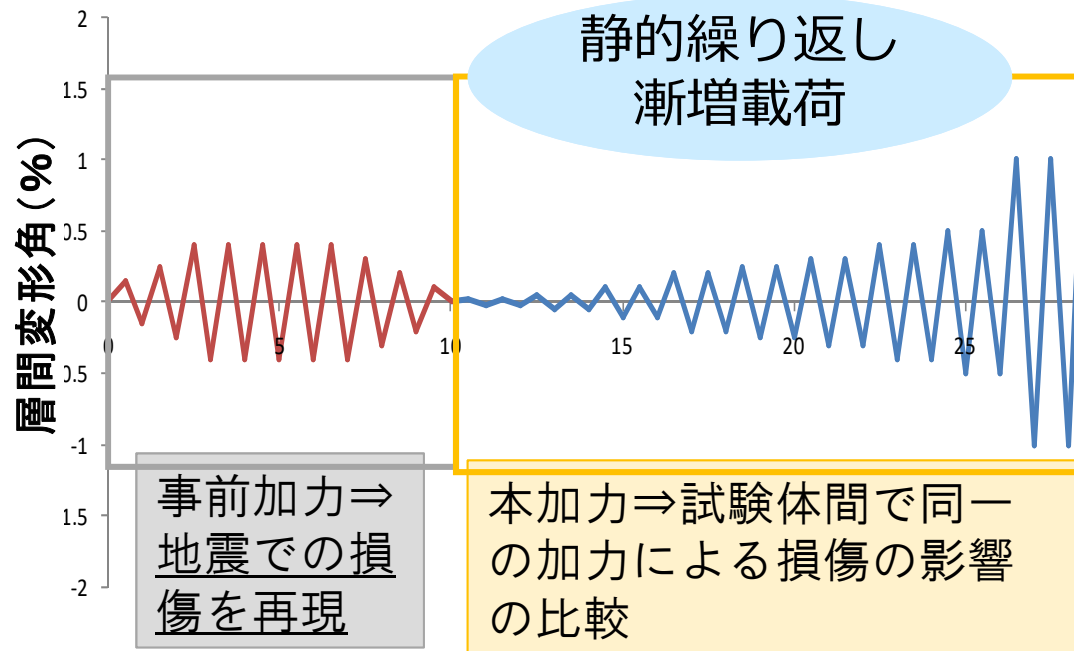
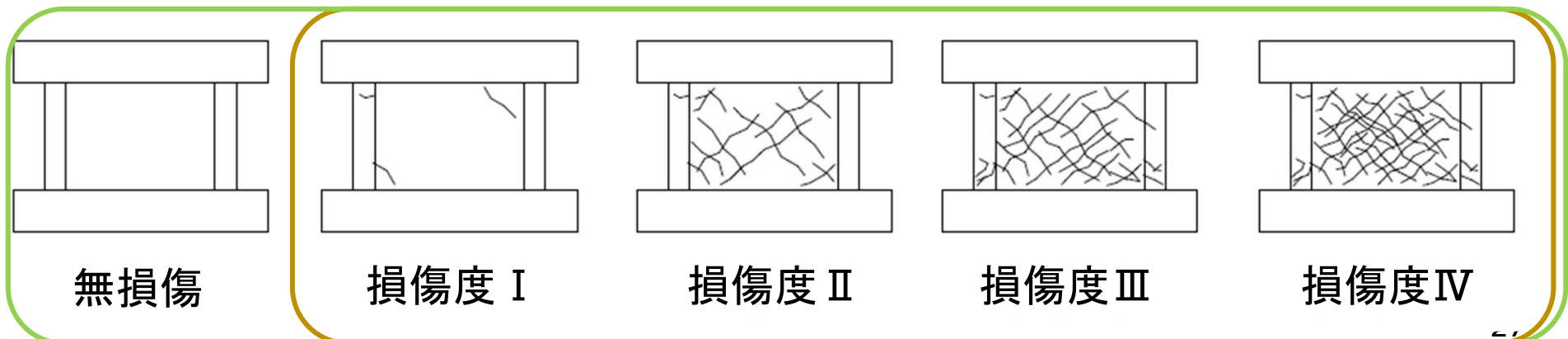


写真 加力装置



地震・爆発履歴によるRC構造性能変化の評価

耐力の低下率 η_s $\eta_s = \frac{Q'_{max}}{Q_{max}}$

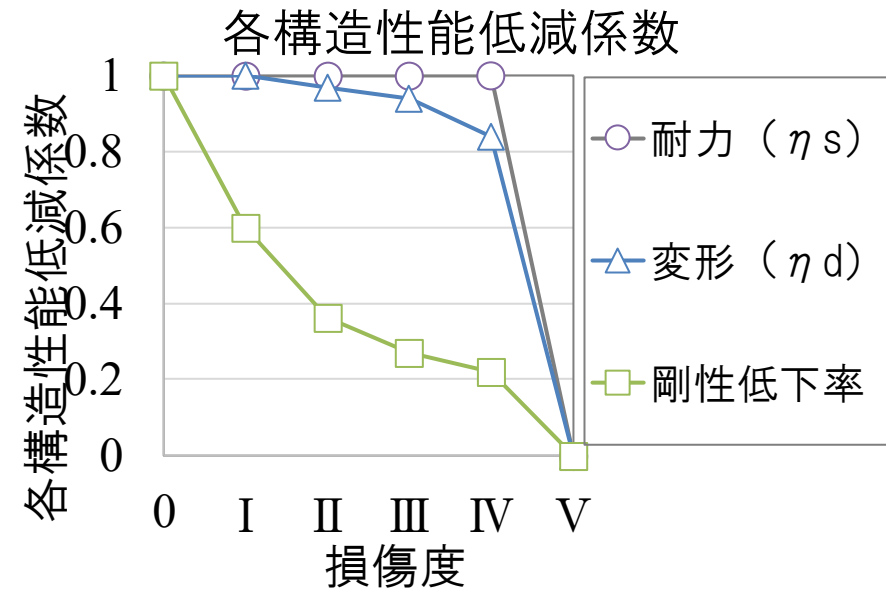
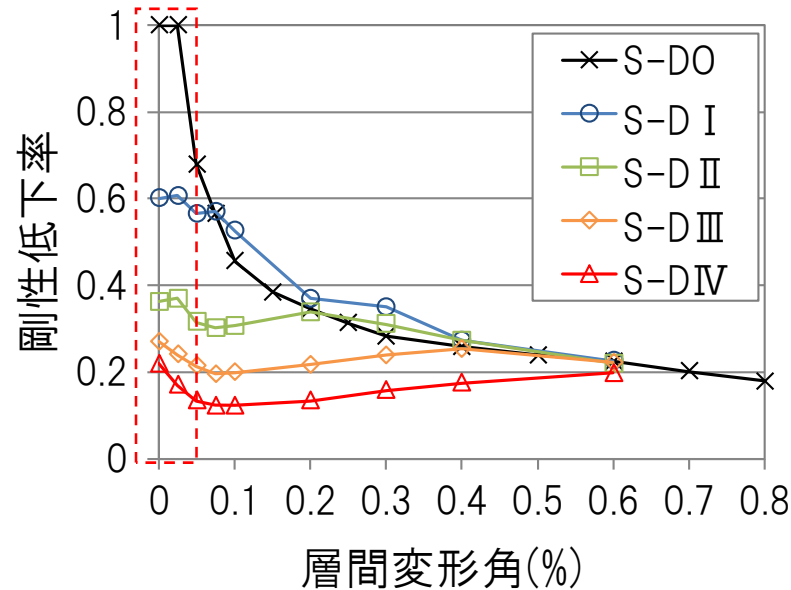
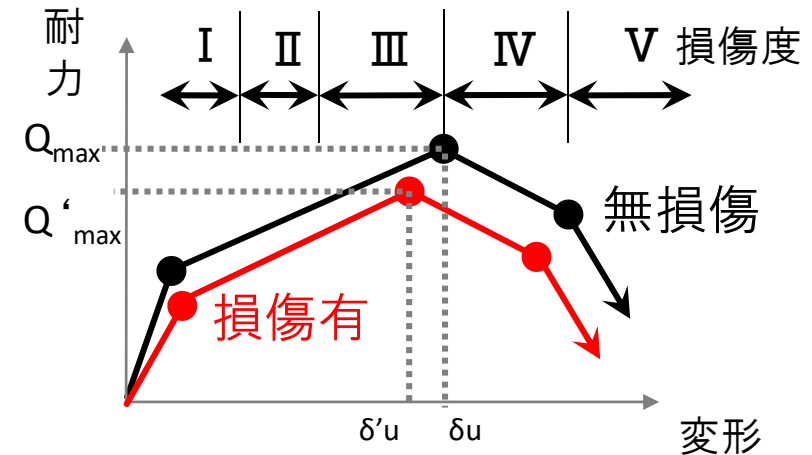
Q_{max} ; 無損傷の耐震壁の最大耐力

Q'_{max} ; 損傷後の耐震壁の最大耐力

変形性能の低下率 η_d $\eta_d = \frac{\delta_u}{\delta'_u}$

δ_u ; 無損傷耐震壁の最大耐力時の変形

δ'_u ; 損傷有耐震壁の最大耐力時の変形

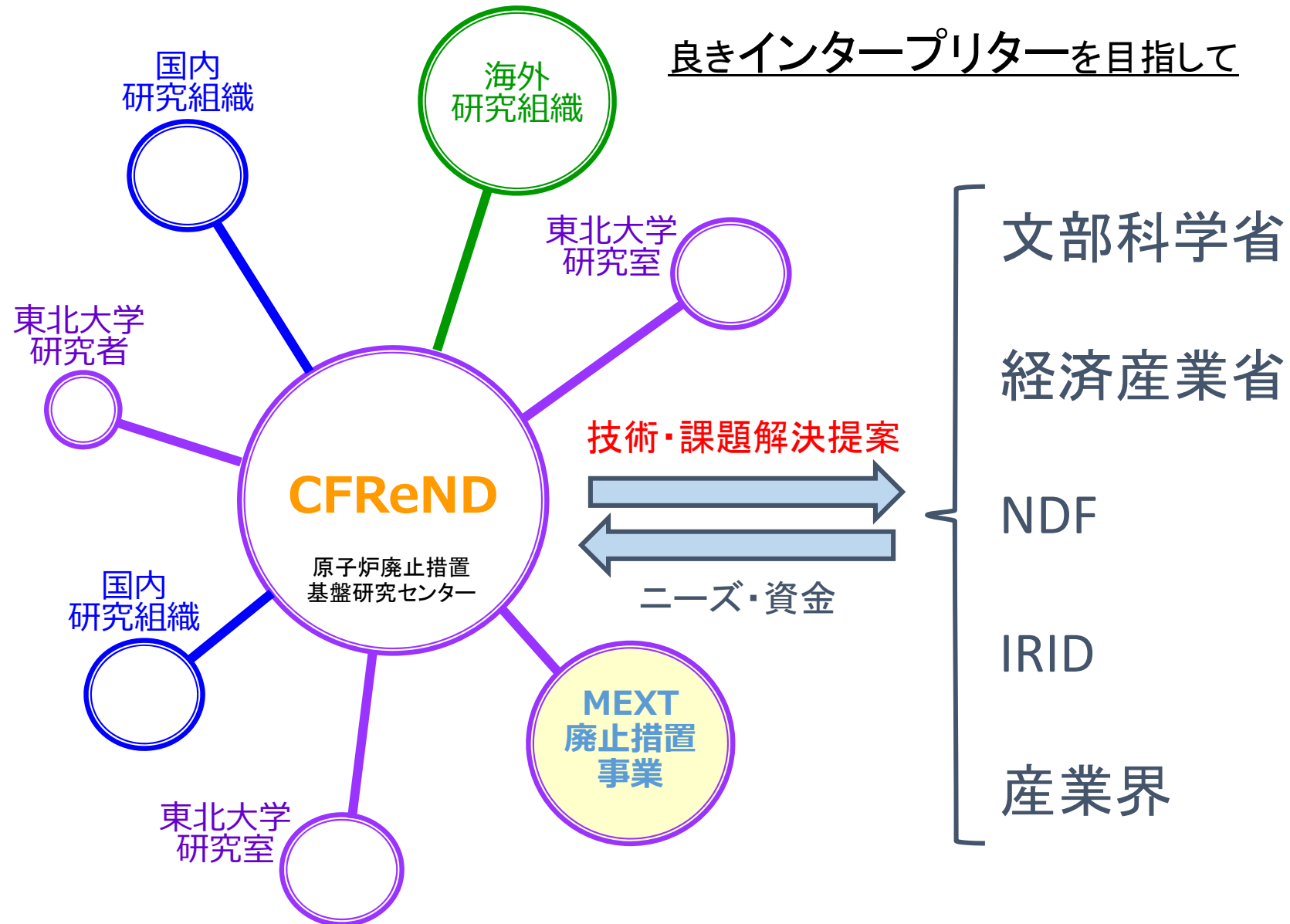


経験した変形の範囲内では、ひび割れにより剛性低下するが、変形が大きくなると回復し、損傷度Ⅲまでは、終局強度、変形性能の劣化はほとんどない



連携推進の役割

研究連携ハブとしてのCFReND



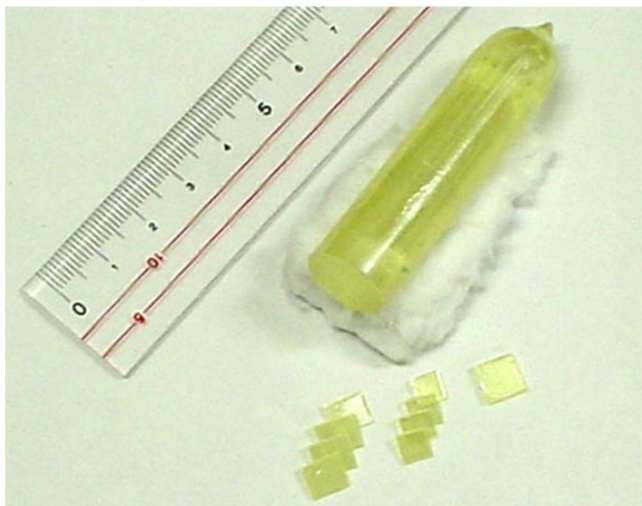
CFReNDが機能した研究連携の例

廃炉加速化研究プログラム(国内研究)

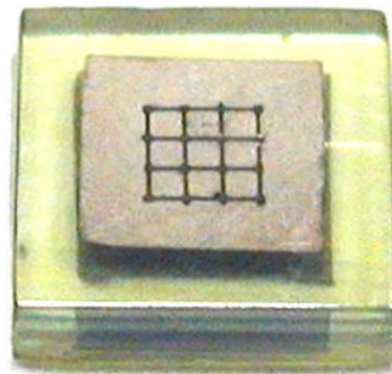
『テーマD2:画期的なアプローチによる放射線計測技術』に提案採択(2017.12)

『高線量率環境下における小型半導体を用いたバーチャルピンホールカメラの開発』(代表機関:JAEA)

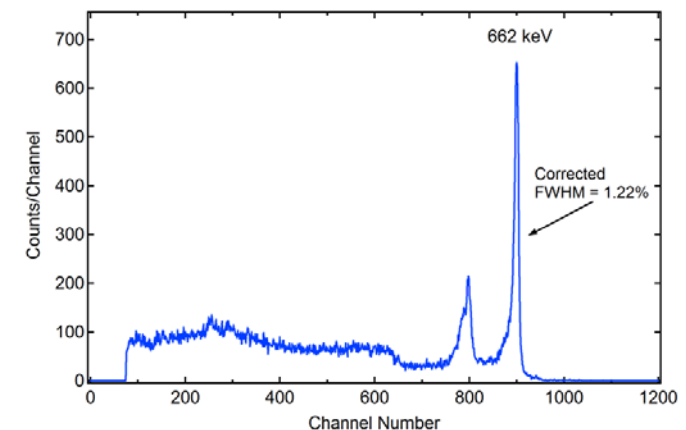
- 東北大学(六ヶ所村分室)のTlBr素子とJAEAの放射線計測システム化技術と東京大学の回路技術を融合した γ カメラシステムの開発
- 建屋内高線量場における γ 線イメージングの取得



TlBr crystals.



Pixelated TlBr detector.
The pixel size is 0.6 mm $\times$ 0.6 mm.



^{137}Cs γ -ray spectrum obtained from a TlBr detector.



配管減肉のモニタリングと予測に基づく 配管システムのリスク管理

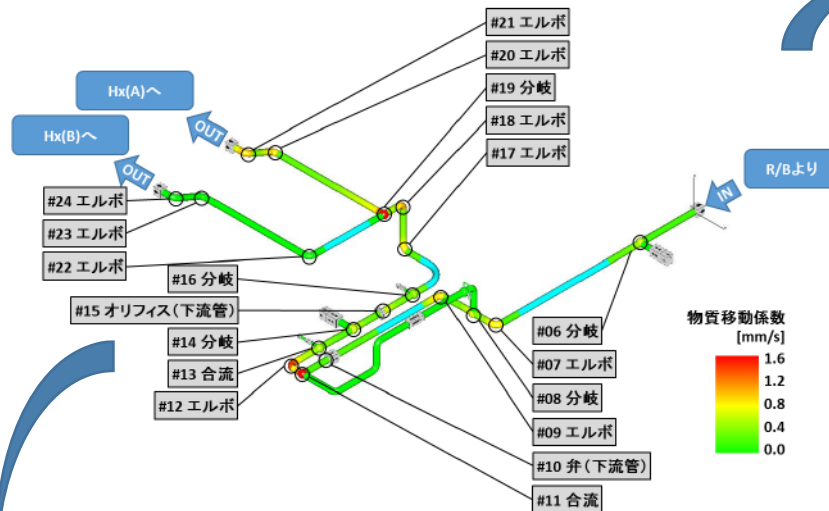
Piping sYstem, Risk management based on wAll thinning
MonItoring and preDiction (PYRAMID)

2017.11～2020

(日) 東北大学 、電力中央研究所、群馬大学

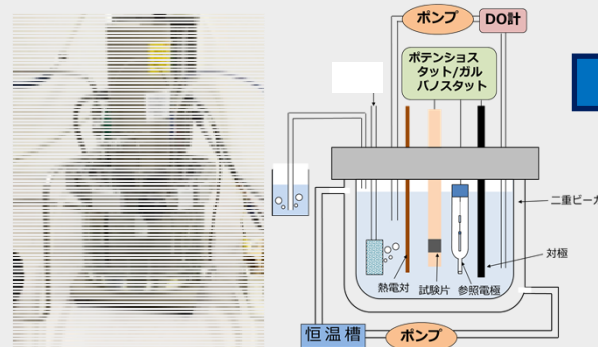
(仏) 応用科学院リヨン校 (INSA-Lyon)、ELyTMaX
原子力・代替エネルギー庁研究所(CEA)、

(1) 固液混相流のモデルと減肉予測



実験と数値解析による物質移動係数分布の評価
【電中研、東北大】

実機物質移動
係数評価情報



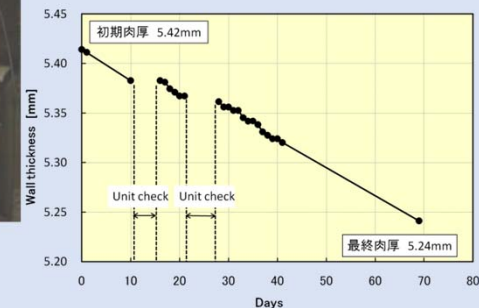
流動下腐食速度・腐食モードの電気化学的評価
【東北大, INSA, ELYTMAX】

物質移動係数分布の予測
⇒肉厚監視位置の選定

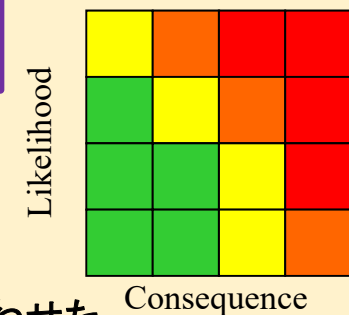
(2) EMATモニタリングシステムの開発 【東北大, INSA, CEA】



FAC減肉モニタリング例



(3) 工学的リスク評価 【群馬大, CEA】



予測とモニタリングを組み合わせた
配管系の工学的リスク評価技術

Fukushima Research Conference

on
Corrosion Prediction and Mitigation for Key Components of Fukushima Daiichi NPS
Organized by CLADS/JAEA, Tomioka-cho, Fukushima, Nov. 27-29, 2017

- ◆ Long-term prediction of carbon steel corrosion
- ◆ Radiolysis effect on corrosion
- ◆ Re-passivation of localized corrosion
- ◆ Microbial influenced corrosion
- ◆ Reinforced concrete corrosion

Conference Chair: Damien Féron (CEA)
Vice-Chairs: Y. Watanabe (Tohoku U.), M. Yamamoto (JAEA)
Invited Lecturers: D. Féron, Y. Fukaya, K. Hata, F. King,
V. l'Hostis, P. Marcus, J. Matsumoto, B. Normand, R. Rebak, N.
Sridhar, N. Tanaka, Y. Watanabe, J.C. Wren



人材育成への取り組み

基盤研究を通じた『人材育成』

【基盤研究】 *現場ニーズが高く、かつ本学の研究ポテンシャルが高い分野*

- (1) 格納容器・建屋等の健全性・信頼性確保のための基礎・基盤研究
→『放射性物質閉じ込め機能』と『安定冷却』の維持
- (2) 燃料デブリの処理と放射性廃棄物の処分に関する基礎・基盤研究
→科学的・合理的な処理・処分方法の策定

【人材育成】

「原子炉廃止措置工学プログラムの設置」

- ①原理・原則に立ち戻って課題解決を図る能力
- ②課題の本質(幹と枝葉)を的確に見分ける能力
- ③異分野専門家との高度コミュニケーション・協働能力

状況が変化する廃止措置工程への的確かつ重層的対応能力を持つ中核人材



博士課程後期(博士) 科目表

区分	授業科目	単位と履修方法		備考
		必修	選択必修	
廃止措置工学 基幹科目	原子炉廃止措置工学特論Ⅰ：概論		2	左記授業科目から4単位以上選択履修すること
	原子炉廃止措置工学特論Ⅱ：腐食防食分野		2	
	原子炉廃止措置工学特論Ⅲ：検査技術分野		2	
	原子炉廃止措置工学特論Ⅳ：燃料デブリ処理分野		2	
	原子炉廃止措置工学特論Ⅴ：リスク・コミュニケーション分野		2	
	リーダー論			
	トップリーダー特別講義			
	原子炉廃止措置工学特別講義			

博士課程前期(修士) 科目表

区分	授業科目	単位と履修方法		備考
		必修	選択必修	
廃止措置工学 基幹科目	原子炉廃止措置工学概論	2		左記授業科目から必修2単位を含めて8単位以上選択履修すること
	原子炉廃止措置工学Ⅰ：鋼構造物保全分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅱ：鉄鋼材料分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅲ：腐食防食分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅳ：環境強度分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅴ：非破壊検査分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅵ：補修・接合分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅶ：コンクリート構造物保全分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅷ：建設材料分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅸ：耐震設計分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅹ：耐震性評価分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅺ：建築物寿命評価分野		2	
	原子炉廃止措置工学Ⅻ：建築物信頼性分野		2	
	原子炉廃止措置工学ⅫⅢ：燃料デブリ処理分野		2	
	原子炉廃止措置工学ⅫⅣ：臨界反応制御分野		2	
	原子炉廃止措置工学ⅫⅤ：放射線防護分野		2	
	原子炉廃止措置工学ⅫⅥ：地層処分分野		2	
	原子炉廃止措置工学ⅫⅦ：リスク・コミュニケーション分野		2	
	原子炉廃止措置工学ⅫⅧ：人間-ロボット・インターフェース分野		2	
	原子炉廃止措置工学ⅫⅨ：行動分析分野		2	
	原子炉廃止措置工学特別講義		2	
学外実習	廃止措置R&Dインターシップ研修	1～2		
	国際インターシップ研修		...	

コア科目「原子炉廃止措置工学概論」集中講義

＜必修＞廃止措置R&Dインターシップ研修

「施設現地調査」の状況(福島第二)



海水熱交換器室



ガスタービン発電機



原子炉建屋内(オペフロ)



海水熱交換器室(津波跡)



主蒸気隔離弁



原子炉格納容器内



原子炉格納容器内
(制御棒駆動水圧系配管)



原子炉圧力容器
ペデスタル内

廃炉研究学生交流会議(NDEC)の発足

第1回 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEC-1)

開催日:平成28年3月16日(水)

会 場:東北大学青葉山キャンパス カタールサイエンスキャンパスホール及び青葉記念会館

主 催:廃止措置研究・人材育成等強化プログラム採択7機関

共 催:文部科学省、科学技術振興機構、原子力学会東北支部

協賛:関連学会東北支部

参加者:226名(大学院生44、学部生14、高専生31、産業界80+)

目 的:人材育成を目的とした学生のための技術カンファレンス

実施内容:

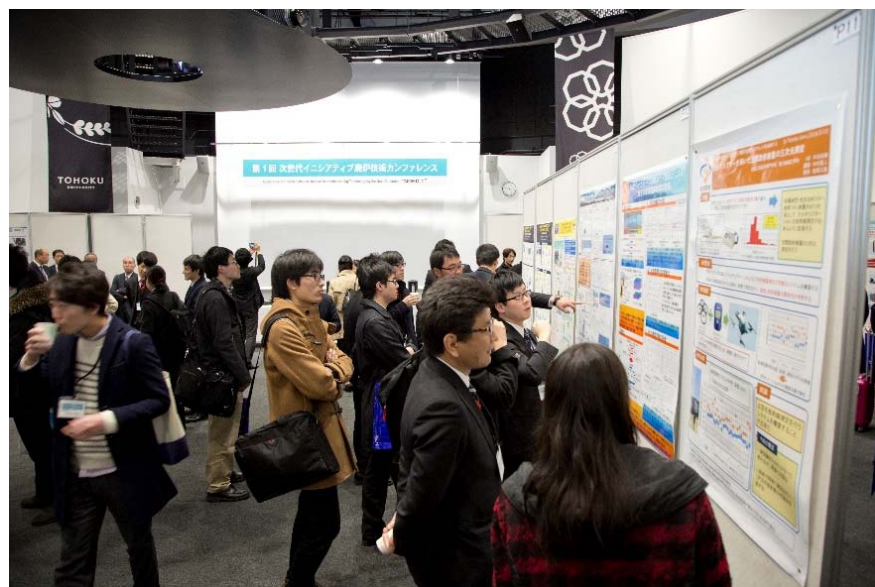
- (1) 学生の研究発表は、下記の専門分野に分類してセッション構成。
 - a. 廃止措置時の設備管理(検査、劣化評価、補修等)に関する研究
 - b. 遠隔操作技術に関する研究
 - c. 燃料デブリ処理、放射性廃棄物の処分に関する研究
 - d. 核種分析に関する研究
 - e. その他、原子炉廃止措置に関連する分野の研究
- (2) 優れた研究内容あるいは優れた発表に対して、学生を表彰。

→ 大学持ち回り主催による定例会議(毎年開催)に発展

NDEC-1ポスターセッション



産側研究者・技術者と学生が直接技術交流する場としても機能





□ 基調講演1件、招待講演2件

□ オーラル発表：学生31件
 「設備管理」「遠隔技術」「燃料デ
 ブリ処理」「廃棄物処分」「核種
 分析」など6セッション

＜我が国廃炉研究・技術の専門
 家と学生が直接議論する場＞



□ 特に優れた研究に対して学
 生8名が受賞

＜廃炉研究に携わる学生間
 の切磋琢磨＞

□ ポスター発表
 学生21件、企業等29件

＜産側研究者・技術者と学生
 が直接技術交流する場として
 も機能＞





事故炉廃炉研究は東北大学建学の精神実践の場

東北大学グローバルビジョンからの抜粋
(+ 渡邊の解釈)

研究第一主義

日々の研究の実践を通じて未来を担う若者の育成にあたる。

実学尊重

研究を通して見いだされた知識を社会へ波及させ、課題を克服、未来を先導。(真に価値の高い研究課題は、現場から見いだされる。)

門戸開放

多様な価値観やバックグラウンドの人材を受け入れる知の共同体。(多様性の尊重)

ご清聴ありがとうございました。

東北大学は、福島第一原子力発電所の安全着実な廃炉に貢献するために
息長く努力してまいります。

皆さまの変わらぬご支援をお願い申し上げます。