



Japan Atomic Energy Agency

# 安全研究センターにおける研究の概要

日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門  
安全研究センター

丸山 結

令和元年度 安全研究センター報告会  
令和元年11月26日  
富士ソフト アキバプラザ

# はじめに

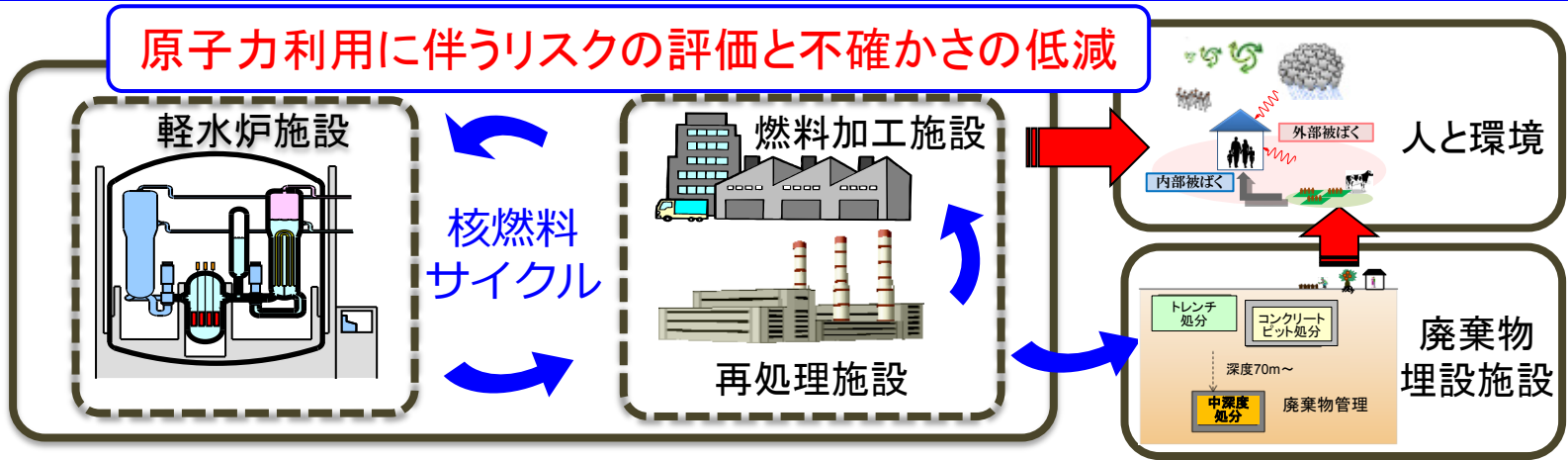
- 安全研究・防災支援部門(安全研究センター及び原子力緊急時支援・研修センター)のミッション
  - ◆ 規制活動や国・自治体の緊急時対応を技術的に支援

## 安全研究の目的

- より科学的・合理的な安全規制の構築や継続的な安全性の向上、核拡散防止に係わる保障措置の高度化に必要な知見の創出
  - ◆ 規制基準の見直しやリスク情報を活用した意思決定等に向けた知識ベースの整備
  - ◆ 深層防護層の頑健性評価(原子力防災を含めた安全対策の有効性評価)
  - ◆ 評価技術の不完全さや不確かさの低減

- 研究基盤(研究施設や解析・評価手法)の維持・整備
- これらを活用した安全研究の着実な実施及び人材の確保・育成
  - ◆ 原子力規制委員会等、行政機関からの要請に基づいた安全研究
  - ◆ 長期的視点からの先導的・先進的な安全研究

# 安全研究の対象分野



## ■ 燃料安全研究

通常運転時の燃料挙動、事故時の燃料破損条件やその影響等に係わる実験研究と燃料挙動解析コードの整備

## ■ 熱水力安全研究

大型装置を用いた実験や解析手法の整備、事故進展の評価やシビアアクシデント対策の有効性評価

## ■ 材料・構造安全研究

照射環境下における材料の経年変化の評価、安全上重要な機器・構造物に対する外部事象の影響評価や確率論的破壊力学評価手法の整備

## ■ シビアアクシデント評価研究

ソースターム評価(レベル2PRA)手法の高度化やダイナミック確率論的リスク評価(PRA)手法の整備、シビアアクシデント対策の有効性評価

## ■ 臨界安全研究

福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し時における臨界リスクの評価・管理

## ■ 燃料サイクル安全研究

再処理施設等の重大事故時におけるソースターム評価や臨界事故評価

## ■ 放射性廃棄物・環境安全研究

福島第一原子力発電所の汚染物を含む廃棄物の保管・貯蔵・処分及び原子力施設の廃止措置に係る安全評価手法の整備

## ■ 放射線安全・防災研究

オフサイト事故影響評価(レベル3PRA)手法の整備、原子力災害時の公衆被ばく評価、防護措置の有効性評価

## ■ 保障措置分析化学研究

環境試料中の極微量核物質分析手法の開発

# 安全研究の進め方

- 独立性・中立性、透明性・説明性の確保と実効性の向上
- 社会情勢の変化やニーズに対応した適時・的確な研究課題の選定
- 外部資金と運営費交付金を併用した研究基盤の維持・整備
- 安全研究の将来を担う人材の確保・育成（博士研究員の採用やOJTの強化等）
- 実験と解析・評価を両輪とした安全研究を通じた研究力・技術力の向上（規制を支援する組織として必要な総合力の向上）
- 規制情報等の収集やそれを分析・活用する機能の強化（規制・国際情報分析室の設置）
- 国際協力を含む機構内外との連携・協力の推進
- 研究成果等の積極的な発信

国際協力等に  
基づいた実験  
データの入手

多様な施設を  
活用した実験

先進的な分析  
・計測手法の  
開発・応用

検証データ  
解析モデル  
→  
←  
実験ニーズ

目的に応じて詳細度  
の異なる種々の解析  
・評価コード

不確かさ・感度  
解析手法

# ニーズに対応した研究の強化

福島第一原子力発電所事故

社会情勢の変化

多様性を維持しつつ研究課題を重点化

- シビアアクシデント(SA)の発生防止及び影響緩和に係わる研究
- 緊急事態への準備と対応(原子力防災)に向けた研究
- 外部事象(地震、飛翔体衝突等)の影響に係わる研究
- 福島第一原子力発電所の詳しい技術的調査・分析と安全な廃止措置・放射性廃棄物管理に係わる研究
- 放射性廃棄物に関する中深度処分への対応
- 廃炉材を活用した材料・構造に係わる研究

# 安全研究を支える主な研究施設

## 軽水炉

- シビアアクシデント／リスク評価
- 燃料安全
- 熱水力安全
- 材料・構造安全

### 燃料



原子炉安全性研究炉 (NSRR)



燃料試験施設 (RFEF)

### 熱水力 シビアアクシデント



大型格納容器  
実験装置 (CIGMA)



大型非常試験装置 (LSTF)

## 核燃料サイクル施設・廃棄物処分施設等

- 重大事故／リスク評価
- 臨界安全
- 放射性廃棄物処分安全評価
- 廃棄物埋設の坑道閉鎖措置確認

### 燃料サイクル 安全



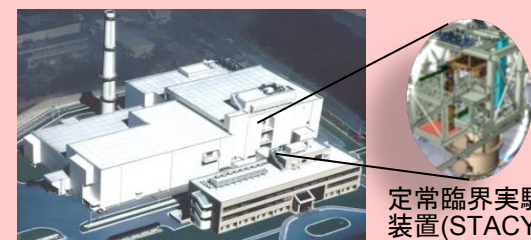
核燃料サイクル施設火災 (ACUA)

### 保障措置



高度環境分析研究棟 (CLEAR)

### 臨界・ 廃棄物処分



燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF)

### 外部事象

- 原子力施設耐震評価



高温工学試験研究炉 (HTTR)



地震観測システム

# 最近の主な実験及び解析(1/2)

## ■ 燃料安全研究

- 反応度事故時や冷却材喪失事故時における改良型燃料の破損挙動や高燃焼度燃料被覆管のブレイクアウェイ酸化に関する実験
- 燃料挙動解析コードFEMAXI-8の開発・系統的検証及び外部への公開

## ■ 熱水力安全研究

- LSTFを用いた運転員の回復操作(2次系減圧等)を伴う蒸気発生器伝熱管(多数管)破損事故模擬実験や高圧熱流動実験ループ(HIDRA)を用いた高出力時炉心熱伝達(沸騰遷移やリウエット特性)実験
- CIGMA装置を用いた格納容器ベント時や格納容器外面冷却時における格納容器内水素移行・混合実験及びCFDコード(OpenFOAM)による解析、プールスクラビング及びスプレイによるエアロゾル除去実験

## ■ 材料・構造安全研究

- ノンパラメトリックベイズ手法を応用した原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化予測
- 確率論的破壊力学(PFM)解析コードPASCAL4の信頼性評価及び実機評価への適用
- 3次元詳細モデルによる建屋地震応答解析手法の標準化及び建屋や配管を対象としたフラジリティ評価手法の高度化、飛翔体衝突による建屋局部損傷等解析手法の整備

## ■ シビアアクシデント評価研究

- 原子炉冷却系(RCS)内のセシウム及びヨウ素化学に及ぼすホウ素の影響に関するTeRRa実験及び熱化学平衡解析コードの検証、RCS内FP化学を考慮したSA総合解析コードTHALES2/KICHEによるBWRソースターム評価
- 熔融炉心／冷却材相互作用解析コードJASMINEの改良及び熔融炉心／コンクリート相互作用防止対策(格納容器内事前注水)の有効性評価

# 最近の主な実験及び解析(2/2)

## ■ 臨界安全研究

- 乱雑な組成分布を有する燃料デブリの臨界特性を不確かさを含めて評価可能な解析手法の開発及び連続モンテカルロ計算ソルバーSolomonへの実装

## ■ 燃料サイクル安全研究

- 高レベル濃縮廃液蒸発乾固事故時における高揮発性ルテニウム( $\text{RuO}_4$ )の放出抑制に及ぼす亜硝酸の影響に関する実験
- グローブボックスパネルの燃焼特性や煤煙によるHEPAフィルタ目詰まりに着目したACUA装置による火災実験

## ■ 放射性廃棄物・環境安全研究

- 将来における隆起・浸食等による地形変化及びそれに伴う地下水流動変動に係わる3次元評価手法の開発
- ベントナイト系人口バリア変質挙動評価に向けた物質移行／変質連成解析コードMC-BUFFERにおける物質拡散モデルの改良

## ■ 放射線安全・防災研究

- THALES2/KICHEコード(レベル2PRA)と事故影響解析コードOSCAAR(レベル3PRA)のインターフェース整備
- 屋内退避の有効性検討に必要なパラメータ(家屋の自然換気率や放射性物質の浸透率)の整備や一時退避施設の放射線防護性能評価に係わる実験
- 2経路の外部被ばくと4経路の内部被ばくを考慮した公衆被ばく線量評価モデルの開発及び不確かさ・感度解析

## ■ 保障措置分析化学研究

- 多様な測定技術(顕微ラマン分光分析やICP-MS)を利用したウラン化合物の化学形や高濃縮ウラン粒子を対象としたウラン生成時期を推定する手法の開発
- 同位体比の高精度分析が可能な大型二次イオン質量分析装置(LG-SIMS)の最適分析条件や性能を検討・評価



# 国際協力及び共同研究の方針

- 機構の「国際戦略」(平成29年3月)に基づき、原子力の安全及び防災に関する研究を海外の研究機関等との連携、協力の下で積極的に進め、その成果を広く発信、共有し、国際的にも原子力安全の確保に貢献
  - ◆ 大規模な実験設備を利用した研究プロジェクト等の効率的推進
  - ◆ 諸外国の研究者との交流による研究力・技術力の向上、ネットワークの構築及び人材育成
  - ◆ 原子力規制庁との緊密な連携
  - ◆ 国際機関における活動への参加・協力を通じて我が国の安全規制の継続的改善へ貢献
- 相補的に研究基盤(実験装置、解析手法、実機情報等)を活用し、課題解決に向けた成果を効果的に創出するために国内外機関との共同研究を積極的に推進
  - ◆ 原子力事業者等や原子炉設備メーカーを含め、共同研究の相手先と対等な立場を堅持しつつ、成果の共有と評価の自由(評価の独立性)を確保
  - ◆ 共同研究の実施プロセス・体制や成果を公開(透明性の確保)

# 国際協力研究の概要

## JAEA(東海)における主な研究施設

### 例) 臨界安全

**IRSN(フランス)**

- 情報交換,  
JAEA職員駐在

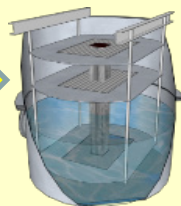
**NCCP(ロシア)**

- STACY燃料製作

(NCCP: ノヴォシビルスク化学集中プラント)

**OECD/NEA**

- **ICSBEP**(国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト)



**STACY\*1  
更新炉**



**NSRR\*2**



**LSTF\*3**



**CIGMA\*4**



**CLEAR\*5**

### 例) 保障措置

**IAEA**

- NWAL(ネットワーク分析所)

**OECD/NEA CSNI SESAR/SFEAR2**  
(原子力施設安全委員会 安全研究上級専門家グループ/  
現行および先進的原子炉のための支援施設)

- \*1: STACY(定常臨界実験装置)
- \*2: NSRR(原子炉安全性研究炉)
- \*3: LSTF(大型非定常試験装置)
- \*4: CIGMA(大型格納容器実験装置)
- \*5: CLEAR(高度環境分析研究棟)

## 多国間協力

**OECD / NEA**

- CSNIワーキンググループ  
{WGFS(燃料安全)、WGFCs(サイクル安全)、WGAMA(事故解析・管理)、WGIAGE(構造機器長期健全性)、WGRISK(リスク評価)}
- CSNI SESAR/SFEAR2
- ジョイントプロジェクト  
{ROSA(熱水力、終了)、CIP(反応度事故時燃料挙動、終了)、BSAF(1F事故解析、終了)、Halden(燃料)、SCIP(被覆管健全性)、ICSBEP、**ARC-F**(2019.1月開始)等}

**IAEA**

- NWAL、RANET(緊急時対応)、ANSN(アジア原子力安全ネットワーク)

**NUGENIA**

- IPRESCA(プールのスクラビング)

**EU**

- MUSA(ソースタームの不確かさ)
- MITHYGENE(水素燃焼解析)
- 共同研究センター(JRC)との協定

**Canada** (マクマスター大学)

**France**

- IRSNとの協定
- CEAとのフレームワーク協定
- VERDON5 {SA時FP放出挙動評価(CEA)}

**Germany**

- カールスルーエ工科大学とのフレームワーク取り決め

**Korea**

- KAERIとの協定

## 二国間協力

**Norway** (エネルギー技術研究所)

**U.S.A.**

- NRCとの協力覚書

**Russia**

- STACY燃料製作(NCCP)
- PWR被覆管照射成長(無機材料研究所)

**Sweden** (スウェーデン王立工科大学)

# 主な共同研究(1/3)

## 燃料安全

### 事故耐性燃料挙動 (早稲田大学) 解析コードの開発

事故耐性燃料の一つであるFeCrAl系被覆燃料の解析に必要な物性モデルを整備、FEMAXI-8等燃料コードへ反映

- 通常時・事故時挙動を評価
- IAEA/ACTOF 国際ベンチマークに参加、モデルの妥当性を検証(早大、FEMAXI-7)

FeCrAl物性モデル  
ヤング率 熱伝導率  
密度 比熱 熱膨張率  
クリープ速度 etc...

燃料コードへ  
組み込み

FEMAXI-8 通常時/  
異常過渡  
RANNS 事故時

## 構造健全性評価

### 確率論的破壊力学(PFM)解析コードの検証 (茨城大、長岡技科大、電中研、MHI、IHI、東芝、 日立、みずほ情報総研等)

- PASCAL信頼性向上WGを設置し、解析コードの検証を推進
- WGの参加機関でソースレベルの検証を実施
  - 比較解析や感度解析等により検証を実施

PFMの実用化に寄与

JAEA

- PASCALの整備
- WG活動成果の取りまとめ

WGの参加機関

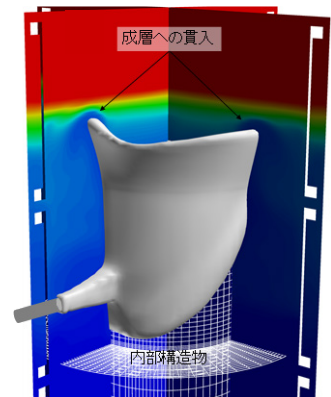
- ソースレベルの確認
- 比較解析等の実施
- 機能追加に関する要望

## 熱水力安全

### 格納容器内水素移行に関する研究(フランスCEA)

水素のような低密度気体による浮力流れを精度よく解析するためにRANS型乱流モデルを改良

CEAで実施された大型模擬格納容器実験の結果を用いて精度検証し、乱流輸送特性に関する考察から現象の物理的妥当性を確認(Abe et al., 2018)

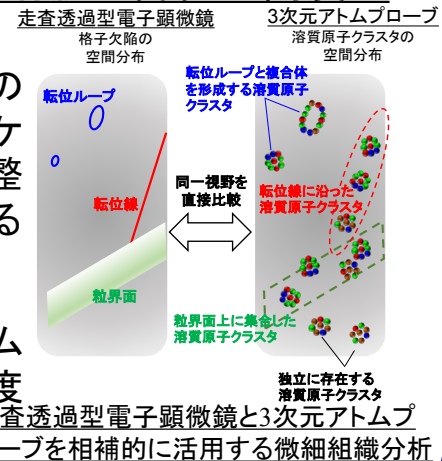


## 材料・水化学

### 原子炉圧力容器鋼の照射脆化評価の高度化 に関する研究(電中研)

電中研の所有する最先端の分析装置を用いたナノスケールの組織観察、JAEAが整備した統計解析手法による微細組織と脆化の相関評価

照射脆化の詳細メカニズム  
解明、照射脆化の予測精度  
向上



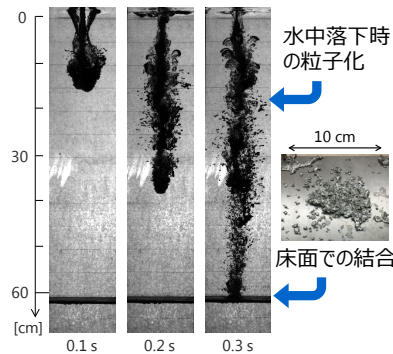
# 主な共同研究(2/3)

## シビアアクシデント評価

### 溶融炉心粒子のアグロメレーション挙動に関する共同研究(筑波大学)

実験結果を活用して格納容器床上に落下した溶融炉心粒子の再結合挙動をモデル化

溶融炉心／冷却材相互作用解析コードJASMINEにモデルを導入しMCCI防止対策の有効性を評価



## サイクル安全

### 火災防護に関する研究(フランスIRSN)

原子力施設における火災防護及び放射性物質閉じ込め研究分野における情報交換を実施

可燃物燃焼に伴う放射性物質放出移行・HEPAフィルタ閉じ込め評価モデルの構築



火災試験装置 (ACUA)

JAEA取得データ(基礎データ):  
 ・燃焼速度、発熱量、煤煙特性  
 ・HEPAフィルタ目詰まり挙動

情報交換

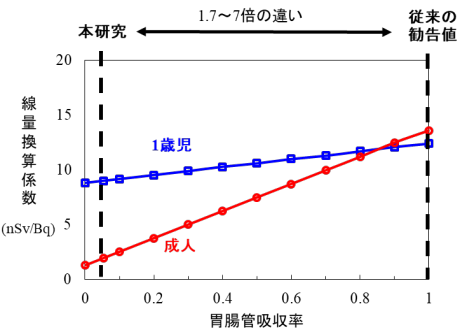
大規模試験装置を用いた実証的データ、閉じ込め評価手法の理論的考察 (IRSN)

## 放射線安全・防災

### 原子炉事故後の汚染地域における住民の被ばく線量評価に関する研究(京都大学)

放射性セシウムによる汚染食物の消化器系における吸収率を実験的に評価

胃腸管吸収率に対する線量換算係数を整備し、内部被ばく評価モデルを高度化

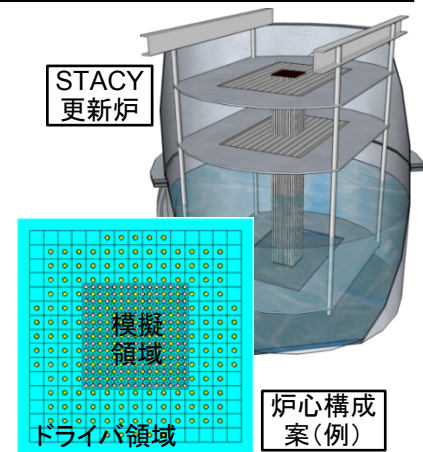


## 臨界安全

### 燃料デブリ模擬臨界実験の計画(フランスIRSN)

デブリ模擬体の核特性測定に適した、定常臨界実験装置STACY(更新炉)の炉心構成を検討(JAEA研究員をIRSNへ派遣)

燃料デブリ臨界特性解析手法(コード・核データ)の検証



STACY 更新炉

模擬領域

ドライバ領域

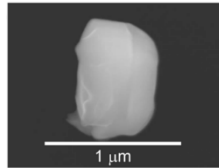
炉心構成案(例)

# 主な共同研究(3/3)

## 保障措置分析化学

### 極微量核物質の分析技術開発に関する国際協力 (IAEA)

微小核物質粒子から高感度で起源や使用履歴に関する正確な情報が得られることによって保障措置体制の強化につながると期待(IAEA)



- ・ LG-SIMSを用いた同位体比分析技術開発
- ・ ウラン精製時期推定分析技術開発

## 環境影響評価

### 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する共同研究(原子力規制庁等)

ガレキ試料中のZr-93等の難溶性核種分析では、Cs-137の溶解データから溶解量を推定する方法が採られ、その妥当性判断の技術情報が必要

模擬ガレキ試料の酸分解、アルカリ溶融等

マイクロ波加熱分解装置等

Cs, Zr等の化学分離、溶解量の分析

ICP-AES等

溶解法と各元素の溶解量との関係性を分析し(JAEA)、適用性(適用範囲等)を検討(規制庁)

## 廃棄物安全

### 廃棄物埋設の坑道閉鎖措置確認に係る研究(原子力規制庁)

- ・ 坑道が確実に閉鎖されていることを確認するための科学的・技術的知見が必要
- ・ 坑道掘削時に形成された岩盤の損傷領域や、コンクリート成分による止水材の変質が水理学的特性に及ぼす影響を把握



コンクリート 岩盤

# まとめ

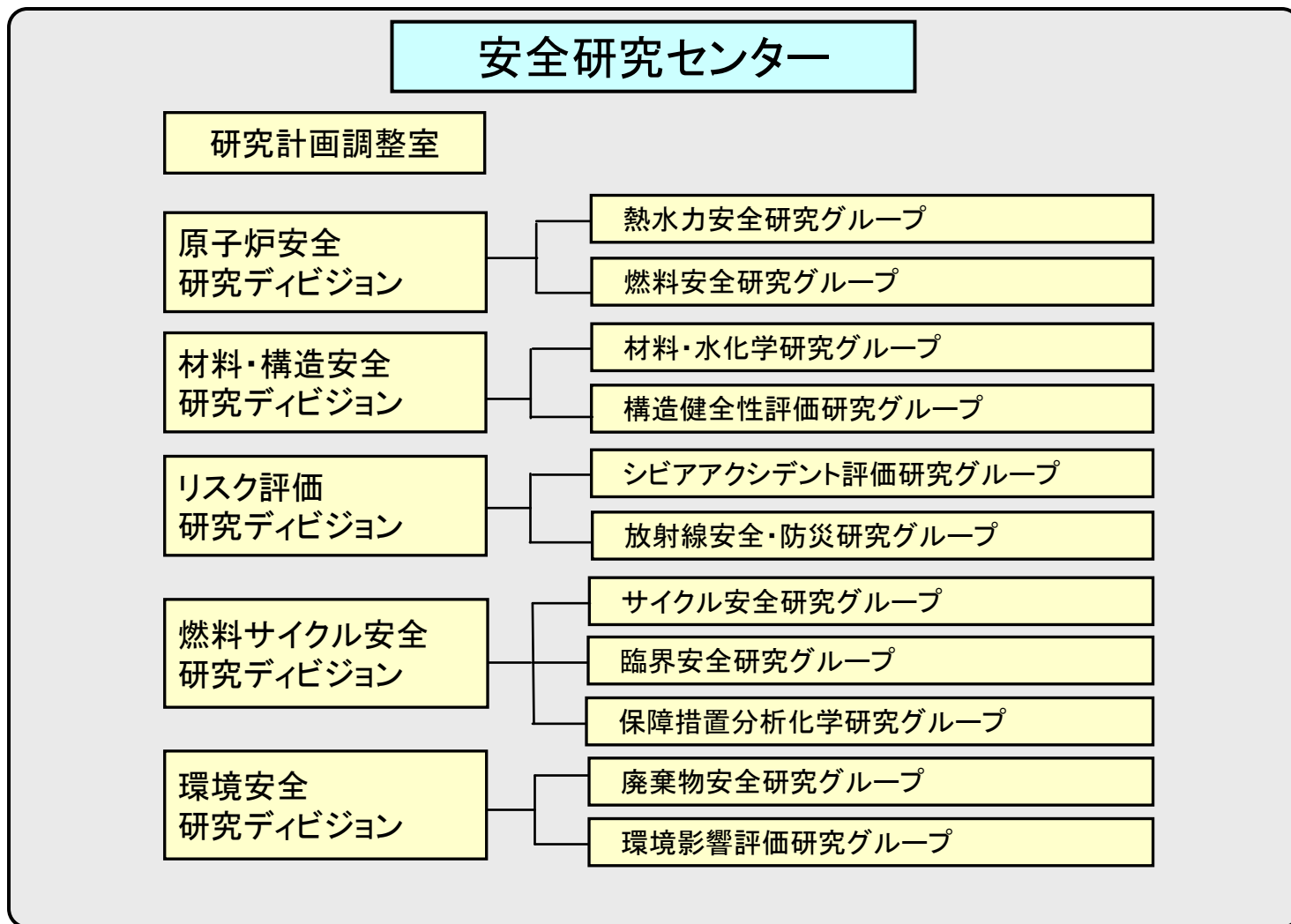
- 安全研究センターのミッションを果たすべく、規制を支援する組織として必要な研究力・技術力の向上に努めている。
- 安全研究を支える研究基盤（研究施設や解析・評価手法）の維持・整備とともに、人材の確保・育成を進めている。
- 福島第一原子力発電所事故や社会情勢の変化を踏まえ、これまでに実施してきた研究の枠に捉われることなく、研究課題の重点化を図っている。
- 規制・国際情報分析室を中心に、規制情報等の収集やそれを分析・活用する機能の強化を進めている。
- 効率的かつ効果的に知識ベースを整備するために、国際協力を含めた機構内外との連携・協力を積極的に推進している。







# 安全研究センターの組織



# 安全研究の進め方(1/3)

---

---

- 独立性・中立性、透明性・説明性の確保と実効性の向上
  - 受託事業や共同研究の実施に係わる内部ルールを定め安全研究センターのウェブサイトにて公開
  - 内部ルールの妥当性を含め規制支援審議会に諮問
- 社会情勢の変化やニーズに対応した適時・的確な研究課題の選定
  - 福島第一原子力発電所事故から得られた教訓の反映
  - 放射性廃棄物に関する中深度処分への対応
  - 原子力規制庁や内閣府等との定期的な意見交換
  - 学会活動等を通じた産業界の動向に係わる情報の収集
- 外部資金と運営費交付金を併用した研究基盤(研究施設や解析手法)の維持・整備

# 安全研究の進め方(2/3)

---

---

- 実験と解析を両輪とした安全研究を通じた研究力・技術力の向上(規制を支援する組織として必要な総合力の向上)及び規制に科学的根拠を与える知識ベースの構築
  - 原子力規制委員会等、行政機関からの要請に基づいた安全研究(主に受託事業による研究)
  - 長期的視点からの先導的・先進的な安全研究(主に運営費交付金による研究)
  - 事故・故障に係わる調査等への人的・技術的支援
- 研究成果等の積極的な公開・発信
- 規制情報等の収集やそれを分析・活用する機能の強化
  - 安全研究センターの規制情報分析室と原子力緊急時支援・研修センターの国際情報課を安全研究・防災支援部門の組織として統合(2018年4月に規制・国際情報分析室を設置)し、GL等を加えてシンクタンク化を指向
  - 施設管理部門に対する技術的助言等

# 安全研究の進め方(3/3)

- 安全研究の将来を担う人材の確保及び育成
  - 研究系職員の採用に加え夏期実習生や博士研究員の積極的な受け入れ
  - 優秀な博士研究員を定年制職員として採用
  - 安全研究を通じたOJTに加え国際協力関係会合等への参加や成果発表
  - 海外研究機関への長期駐在や留学を奨励
  - 原子力規制庁研究職員を任期制職員・外来研究員として受け入れ
- 効果的・効率的な課題の解決に向けた国際協力を含む機構内外との連携・協力
  - 機構内の検討会等による技術的な情報・課題の共有(リスク評価、シビアアクシデント、計算科学等)
  - 福島第一原子力発電所事故の継続的な調査・分析を含む多様な国内・国際協力の展開

# 独立性・中立性、透明性・説明性、実効性

---

## ➤ 独立性・中立性

- ◆ 施設管理組織からの区分、研究協力や外部組織の研究参画などのルール策定等

## ➤ 透明性・説明性

- ◆ 研究プロセス(課題設定、研究方法、検討、結果評価、結論)の透明性
- ◆ 対象とする原子力施設安全性に対する当該研究の位置付けについての十分な説明性(実機適用性等)

## ➤ 実効性

- ◆ 研究能力の向上、人材の育成、施設基盤の維持・発展、国内外の研究機関との交流

# 機構外との連携・協力例(シビアアクシデント)

## 原子炉冷却系内FP化学・移行

- 仏原子力・代替エネルギー庁(CEA)
  - VERDON実験

## 格納容器内FP挙動

- OECD/NEA
  - THAI2, THAI3, STEM2, BIP3計画

## 格納容器内溶融炉心冷却性

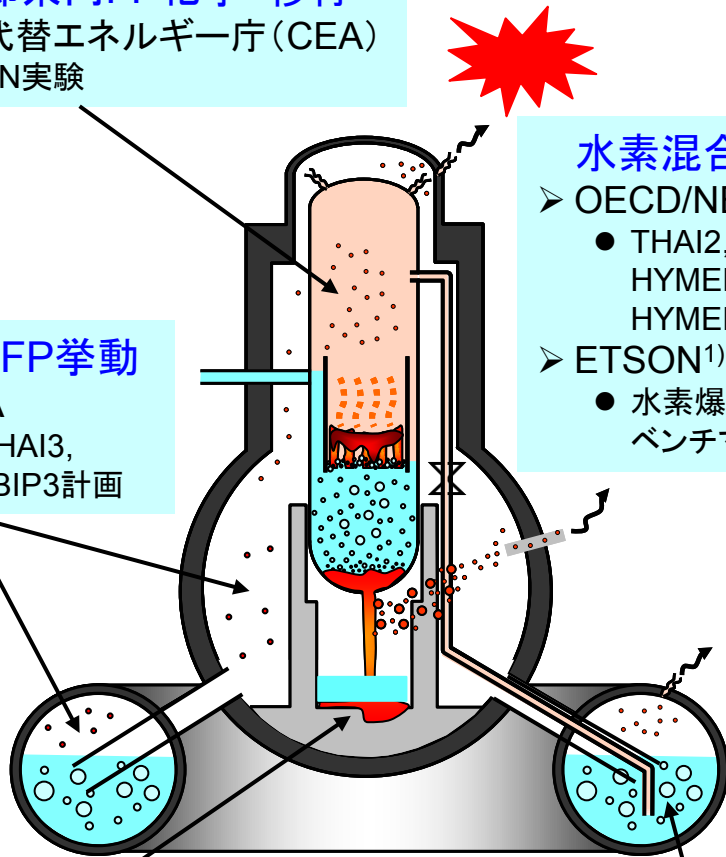
- スウェーデン王立工科大学(KTH)
  - DEFOR-A, PULiMS実験
- 筑波大学

## 水素混合・燃焼

- OECD/NEA
  - THAI2, THAI3, HYMERES, HYMERES2計画
- ETSO<sup>1)</sup>
  - 水素爆燃火炎加速ベンチマーク解析

## プールのスクラビング

- NUGENIA<sup>2)</sup>
  - IPRESCA計画



## 規制庁受託

- ソースターム
- 格納容器内溶融炉心冷却性
- 格納容器内熱水力(水素混合等)
- プールスクラビング

## 全般的協力

- 米国原子力規制委員会(NRC)
- 仏放射線防護原子力安全研究所(IRSN)
- 韓国原子力研究所(KAERI)

## 人員派遣・留学

- IRSN, CEA, KTH
- 米アイダホ国立研究所(確率論的リスク評価)

## 福島第一原子力発電所事故

- OECD/NEA
  - BSAF, BSAF2計画(解析)
  - PreADES計画(デブリ分析予備調査)
  - ARC-F計画(安全研究センターが実施機関となり2019年1月に開始予定の原子炉建屋及び格納容器内情報分析計画)