

(3)

ソースタームに関連する安全研究の課題

2019年 9月 11日
富山大学五福キャンパス

日本原子力研究開発機構(JAEA)
安全研究センター 中村 秀夫

注: 本講の作成に際し、SAとソースタームの多くの研究者の方々より、最新情報をお寄せいただきました。心より感謝を申し上げます。
ただし、内容は主に報告者個人の見解で構成しており、JAEAの意見を代表するものではありません。

目次

1. はじめに

ソースタームとは

2. ソースタームに関わる安全研究について

ソースターム研究の範囲と安全研究の計画について
ソースタームを評価する解析コードについて

3. ソースターム研究の現状

東京電力福島第一原子力発電所(1F)廃炉に関連した研究
個別の研究の例
国際機関等を軸にした研究協力
原子力学会での検討
ソースターム研究の計画検討

4. おわりに

ソースターム研究の課題

1. はじめに

ソースタームとは

- 放出される放射性物質の種類、性状、放出開始時期、放出継続時間、等の総称
 - 原子炉事故に伴う公衆への放射線影響の本質
 - 環境放出を防止・極力低減させる技術の開発・有効性検証における中心的な評価指標
 - 事故時に放射性物質が大気放出に至る様々なプロセスを具体的に考慮し、個々のプロセスに固有の物理化学現象を詳細に検討して、それらを一連の現象として捉えて初めて理解が得られる極めて複雑な内容を包含
- ここでは、特に**オンサイトでのソースターム**に焦点を当て、安全研究の現状と今後の課題の整理を試みる

2. ソースタームに関わる安全研究について

研究の範囲と安全研究の計画(1/2)

- 安全研究は、**放射性物質**の移行経路に特有の流動(液相と気相)、その流動に随伴ないし局所に止まる等の**全ての挙動と、その影響**を考える
- 放射性物質は、**炉心が損傷しなくても大気放出されうる**
 - 例: PWR蒸気発生器伝熱管破断事故(関電 美浜2号)
損傷SGから微量の放射性物質を大気放出
- 核燃料に蓄積された放射性物質(核分裂生成物:**FP**)は**炉心が損傷すると大気放出の可能性を生じる**
 - 炉心損傷 ~ シビアアクシデント(SA)
 - 「閉じ込める」機能の喪失
ペレット、燃料被覆管、RPV等**一次**冷却系、RCV、RB

安全
評価

2. ソースタームに関わる安全研究について

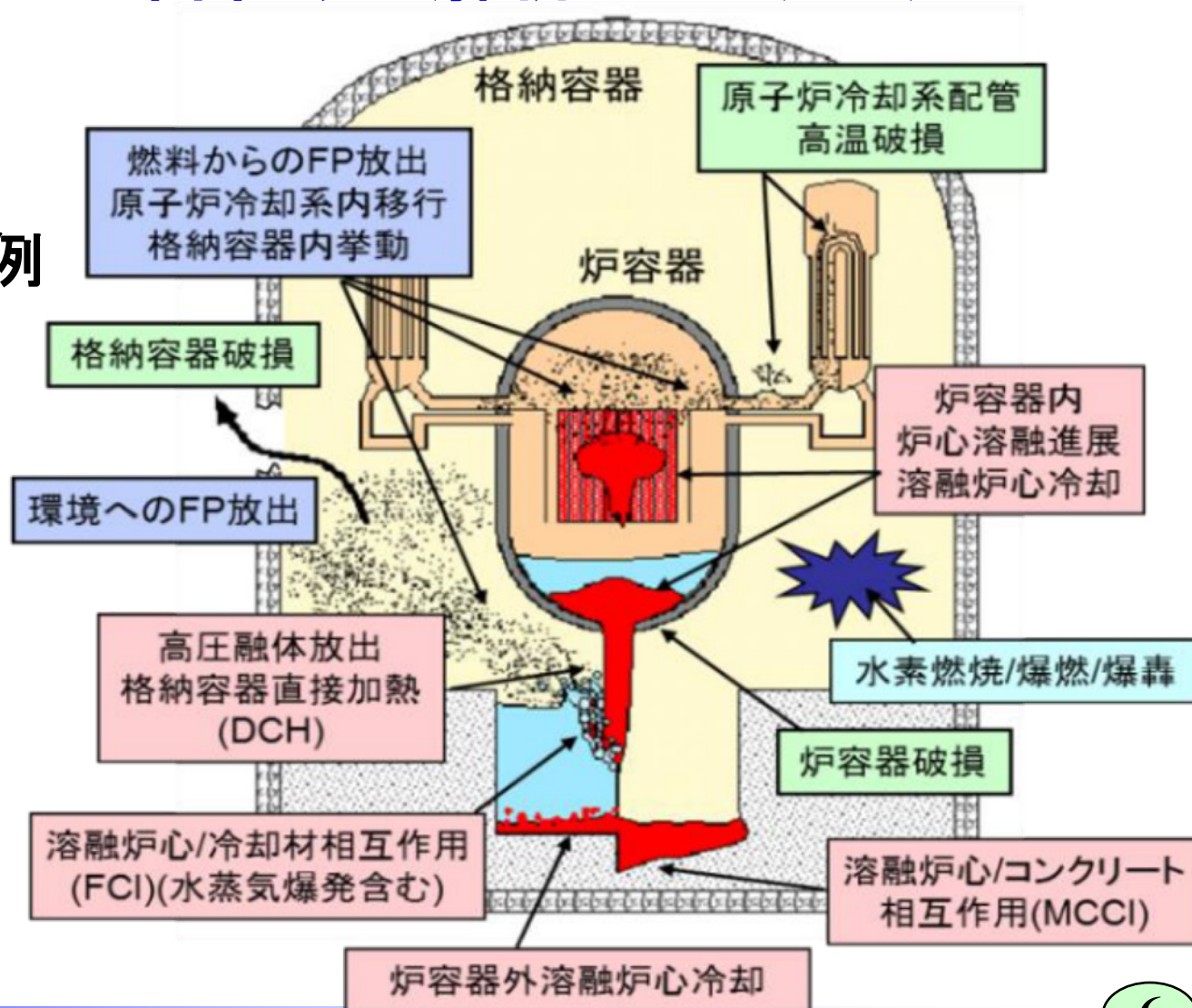
研究の範囲と安全研究の計画(2/2)

- 安全研究の内容検討と実施計画
 - 研究課題と必要性の検討(含、ギャップアナリシス)
 - 特定現象を模擬／実証する**特殊な実験設備**や**計測**の検討
SA時の局所環境(温度、圧力、化学、照射、等)の考慮
 - **解析ツール**の整備(含、PRA等予備検討、解析ツールの開発)
- ソースタームに関わるシビアアクシデント(SA)現象の例
 - 炉心の損傷過程
 - 溶融デブリの挙動(含、FCI、MCCI、等)
 - 流動(気相と液相、多次元、温度分布、不安定性、等)
 - 水素爆発
 - 安定冷却達成後の固化デブリからのリーチング(溶出)

2. ソースタームに関わる安全研究について

ソースタームを評価する解析コード(1/2)

- SA解析コード
が扱う
SA現象の例



2. ソースタームに関わる安全研究について

ソースタームを評価する解析コード(2/2)

- シビアアクシデント(SA)評価はソースターム評価を伴う
 - SAの全過程を数値解析できるSA解析コードを利用

- 解析コードに求められる性能

解析コードの例

- | | | |
|--------|--------------------------|------------------------|
| ➤ LP | 単純化と高速演算 (PRA多数シナリオ一貫解析) | THALES, MAAP |
| ➤ BE | 事故の時系列分析 (比較的詳細) | MELCOR, ASTEC, SAMPSON |
| ➤ 単機能 | 特定現象の詳細解析 (ヨウ素化学、など) | Kiche, ART |
| ➤ CFD的 | 局所～大空間の3次元流動現象 (詳細解析) | JUPITER |

- ソースターム関連現象モデル群パッケージ

- TMI事故以来のSA現象研究の成果

➤ **<例: 梶本氏の講演>**

3. ソースターム研究の現状

東京電力福島第一原子力発電所(1F)廃炉に関連した研究

- 「中長期ロードマップ(H29年9月26日)」に対応した取り組み
- 主要作業に資する情報の提供を行うソースターム研究
IRID, IAE、など
「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発(廃炉・汚染水対策事業)」
 - 汚染水対策、SFPからの燃料取出し、燃料デブリ取り出し、等
 - SAコード(MAAP、SAMPSON)の精度向上による炉内状況の把握支援
- ソースターム評価に関係した基礎的な研究(計画を含む)
JAEA CLADS、など
 - 燃料破損挙動の機構論的な解明
 - 模擬デブリを用いた燃料デブリの特性評価
 - Csの鋼材表面でのCs付着等、化学挙動
 - 1Fから採取されたサンプルの分析、等

3. ソースターム研究の現状

個別の研究の例(JAEA) (1/2)

安全研究センター

● FP化学形の予測など

- VERDON-2及び同-5実験(仏CEA)に基づき、VICTORIA2コード(米)を用いた平衡計算等によるFP化学形に関する予測精度の検証
- 原子炉冷却系内FP化学解析コードCHEMKEqの開発
(平衡論と速度論を考慮可能)

● THALES2コードによる実機解析

- 代替統計モデルの構築と導入(平衡計算で整備したFP化学組成DBに基づく)

● 気相中エアロゾルの除去(液相への移行挙動)に係る基礎的研究

- CIGMA: 3次元の気相流動や混合挙動、格納容器冷却に関する詳細計測実験 >> CFDコード検証とモデル開発
- PONTUS: プールスクラビング実験
- ARES: スプレイスクラビング実験

3. ソースターム研究の現状

個別の研究の例 (JAEA) (2/2)

原子力基礎工学研究センター

● FP化学に関する研究

- SA解析コードの改良に資するため、**FP化学データベース／モデル**を構築 (THALES-2、MAAP、SAMPSON)

- **TeRRa装置実験**

- ✓ **ポロン(B)がCsに与える化学的影響**:
模擬配管内壁に材料クーポンを装着し、CsIや B_2O_3 を随伴させた水蒸気を流入
- ✓ 壁面沈着したCsIへ、還元雰囲気下でB蒸気が及ぼす影響の検討、等



- **模擬FPの物理化学挙動**に関する多様な研究

- ✓ 液滴表面へのエアロゾル沈着挙動
- ✓ エアロゾルの原子炉建屋内の移行と内壁への沈着挙動
- ✓ Csのケイ酸カルシウム材への吸着挙動
- ✓ CsOHのステンレス鋼表面への化学吸着

3. ソースターム研究の現状

<https://criepi.denken.or.jp/jp/nrrc/intro/pdf/roadmap.pdf?2019v2>

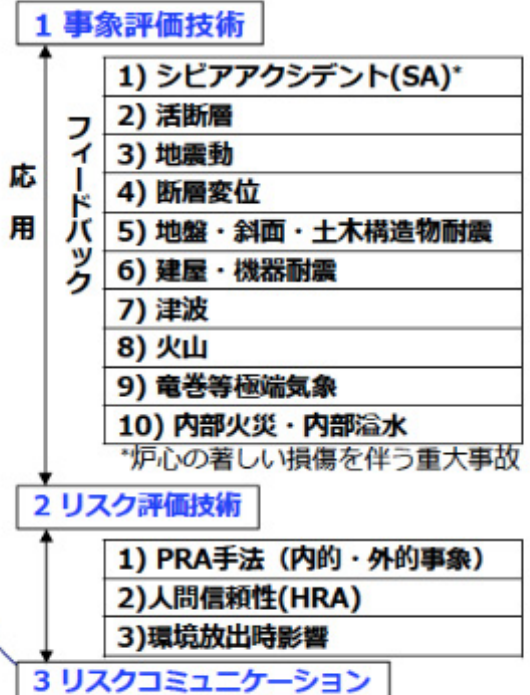
個別の研究の例 (CRIEPI)

原子力リスク研究センター(NRRC) 研究ロードマップ

安全性向上を支えるリスク研究開発

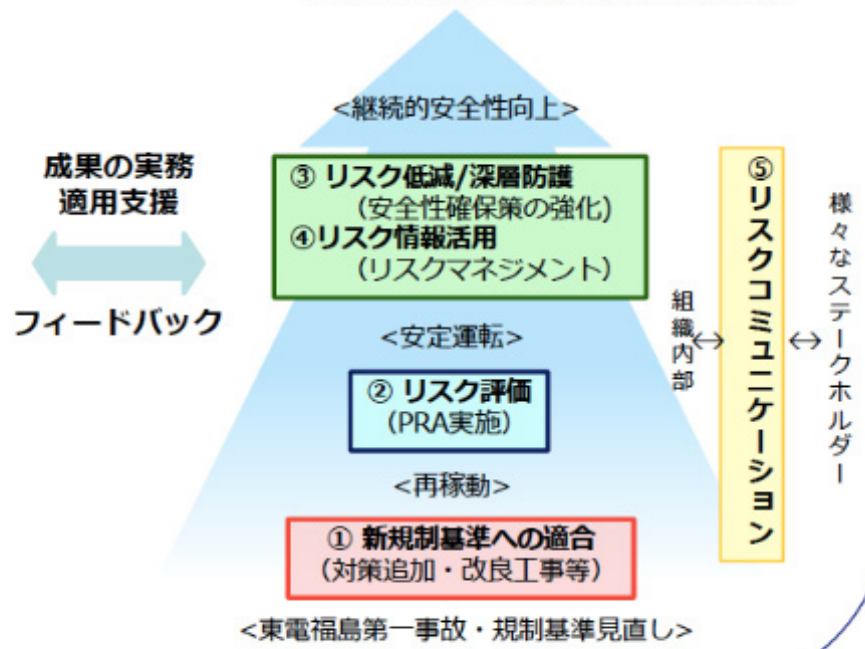
- ・ 低頻度だが大きな被害をもたらし得る事象のさらなる解明と対策立案
- ・ 従来の決定論的な手法に加えてリスク情報を活用する手法を適用

研究開発項目



継続的安全性向上の取り組み

*番号①～⑤は、後述のロードマップの「成果の適用先」の番号に対応



3. ソースターム研究の現状

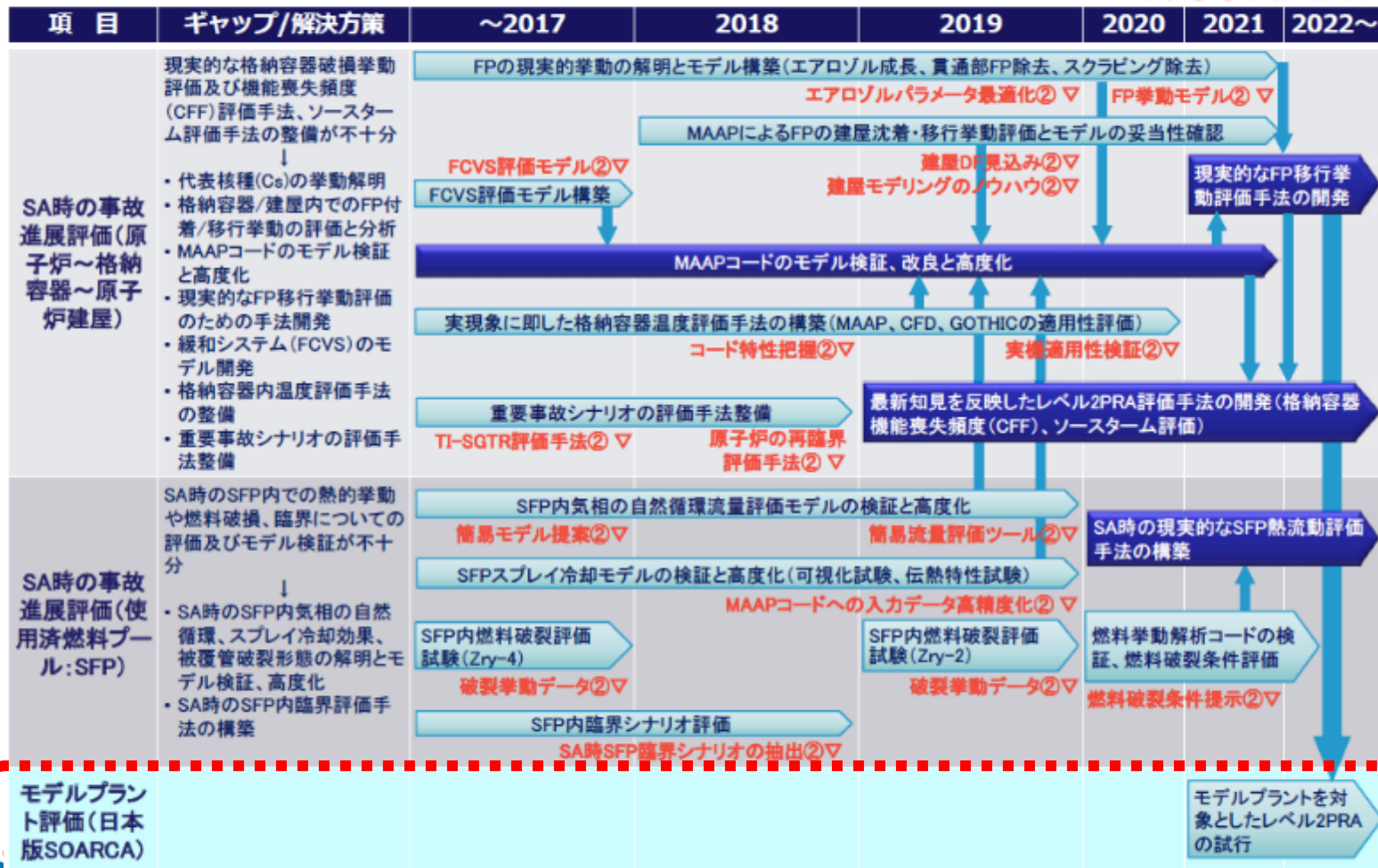
<https://criepi.denken.or.jp/jp/nrrc/intro/pdf/roadmap.pdf?2019v2>

個別の研究の例 (CRIEPI)

原子カリブ研究センター(NRRC) 研究ロードマップ

4. 放射性物質放出リスク評価手法高度化 (レベル2)

▽: R&D成果 (①-⑤: 成果の適用先)



3. ソースターム研究の現状

個別の研究の例(海外)

米国の例

- 特にTMI事故以降、精力的にSA研究が実施され、研究成果は、**独自開発された解析コード**に集積されている
- SOARCA研究プロジェクト(2012年まで)
 - NRC <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/research/soar.html>
 - 代表例: サリー炉(PWR)とピーチボトム炉(BWR)
 - **MELCOR**コードによる SAの最適評価(best estimate)
 - ✓ 種々のSAシーケンスで、ソースターム(環境放出量)を現実的に評価
- MAAP – MELCOR Crosswalk Phase 1 Study(2014年まで)
 - EPRI、サンディア国立研究所(SNL)、NRC、DOE、等
 - 1F事故後、1号機を対象
 - 異なるモデルから予測される結果の差とその要因を詳細に分析

3. ソースターム研究の現状

国際機関等を軸にした研究協力

1F事故に関わる国際共同研究(例)

- **OECD/NEA 原子力施設安全委員会 (CSNI)**
事故の分析と管理ワーキンググループ (WGAMA)
https://www.oecd.emb-japan.go.jp/itpr_ja/00_000211.html
- **SAREF (2013末～2016)** <https://www.oecd-nea.org/nsd/csni/saref.html>
 - 1F事故後の安全研究検討に関する上級専門家グループ
 - 事故から得られる安全研究課題、1Fの安全な廃炉に必要な研究課題の抽出と順位付けを実施
- **BSAF (2012～2018)** <http://www.oecd-nea.org/jointproj/bsaf.html>
[NEA/CSNI/R\(2015\)18](#)
 - 1F事故進展に関するSAコードベンチマーク解析
 - BSAF: 2012、8カ国 >> CSNI報告書
 - BSAF-2: 2015、11カ国

3. ソースターム研究の現状

国際機関等を軸にした研究協力

1F事故に関わる国際共同研究(例、**続**)

■ OECD/NEA/ CSNI/ WGAMA

● ARC-F(2019～) - BSAFの後継

<https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p19012401/>

➤ 「福島第一原子力発電所の原子炉建屋および格納容器内情報の分析」

A) SAコード解析による1F事故の進展と放射性物質の移行挙動のより詳細な推定

B) 原子炉建屋や格納容器の内部調査等から得たデータ・情報の集約と管理

C) 残存課題の明確化と将来の長期プロジェクトの検討

● PreADES(2017～2020、CSNI)

<http://www.oecd-nea.org/jointproj/preades.html>

➤ 「**燃料デブリの分析**に関する予備的研究」

● TCOFF(2019～、NEA 原子力科学委員会(NSC))

<https://www.oecd-nea.org/science/tcoff/>

➤ 「1F事故進展シナリオ評価に基づく

燃料デブリとFPの熱力学特性の解明に係る協力プロジェクト」

3. ソースターム研究の現状

国際機関等を軸にした研究協力

OECD/NEA国際共同研究(主な例)

国際標準問題 ISP は割愛

■ OECD/NEA/CSNI

<http://www.oecd-nea.org/jointproj/>

- TMI事故(1979)以降
- SA時に環境放出を伴うソースターム評価における不確かさの低減を図る

<http://www.oecd-nea.org/jointproj/loft/>

● OECD-LOFT (1983-'89、米NRC) **最初の取り組み**

- 「小型PWR(実炉試験)の損傷炉心からのFP放出を検討」

● BIP (2007-'14、カナダAECL) <http://www.oecd-nea.org/jointproj/bip-3.html>

- 「ヨウ素挙動試験RTFの結果を用いたヨウ素化学プロジェクト」

● STEM (2011-'19、仏IRSN) <http://www.oecd-nea.org/jointproj/stem2.html>

- 「EPICUR試験、等を利用した、ヨウ素やルテニウムの挙動の研究」

● THAI (2007-'19、独GRS等) <http://www.oecd-nea.org/jointproj/thai3.html>

- 「THAI実験による、格納容器内の多次元水素挙動やソースタームの研究」

3. ソースターム研究の現状

国際機関等を軸にした研究協力

各国 ないし ECによる国際共同研究(主な例)

フランス IRSN

<https://www.irsn.fr/EN/Research/Research-organisation/Research-programmes/PHEBUS-PF/Pages/Severe-accident-research-programme-PHEBUS-FP-3455.aspx>

- PHEBUS FP研究プログラム(1988-2010)

- PWR模擬体系で損傷した照射済み核燃料からのFP移行挙動
- EC、EdFと共に実施

<https://www.irsn.fr/EN/Research/Research-organisation/Research-programmes/SOURCE-TERM/Pages/SOURCE-TERM-programme-2991.aspx>

- 国際ソースタームプログラム ISTP(2005-'10)

- 4種の個別効果実験: (a) ヨウ素化学、(c) 空中での燃料棒の過熱、
(b) B₄C制御棒の影響、(d) 高温での照射燃料からのFP放出

スイス PSI

- ARTIST実験プロジェクト(2003-'11)

<https://www.psi.ch/en/sacre/artist>

- PWRの蒸気発生器伝熱管がSA時の高温・高圧で破損した際のFP挙動

3. ソースターム研究の現状

国際機関等を軸にした研究協力

各国 ないし ECによる国際共同研究(主な例)

EC

- **SARNET**(主催機関: 仏IRSN、2004～)
 - 18カ国43機関(米、カナダ、韓、インドを含む)が参加
 - 2013年、NUGENIA(Gen.-II、-III炉を扱うEUプログラム)に組み込まれた
- **ASTECコードの開発**(仏IRSNと独GRSの共同、SA解析コード)
 - 欧州での解析プラットフォームとして解析機能の改善 SAMPSONに近い
- SA研究に関する**欧州レビュー会議 ERMSAR**
 - ソースタームを含む多数の研究発表
 - ソースターム研究の発表例(2019):
燃料損傷模擬実験、PHEBUS実験解析、ヨウ素のスクラビング除去、
液相中放射性物質評価の不確かさ、Csの化学吸着(JAEA)、等 11件

3. ソースターム研究の現状

原子力学会での検討

「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会

http://www.aesj.net/sp_committee/com_fp

- ソースターム研究者の減少に危機感 >> 2017年に設立
 - 3つのWG: FP実験、ベンチマーク評価、技術課題抽出
- PHEBUS実験(仏IRSN)のベンチマーク解析
 - PHEBUS FPプロジェクトの調査報告書の分析、FP挙動に関する情報の共有を通じて、新たな技術者集団の構築を目指す
 - 成果報告: 「事故時の核分裂生成物挙動解明への挑戦」
(日本原子力学会誌 2018年10月)
- 1FでのFP分布の検討
 - 1F事故時のFP挙動について、従来技術では予測できなかったものの抽出と、廃炉作業を含め今後考慮すべき新たな技術課題の整理を試みる
 - 成果報告: 「福島第一原子力発電所の廃炉作業時に留意すべき核分裂生成物の影響評価」 (同誌 2019年9月)

3. ソースターム研究の現状

ソースターム研究の計画検討(1/2)

SARNET

- **SARP** (**S**evere **A**ccident **R**esearch **P**riorities、2013) *Annals of Nuclear Energy 74(2014)4*
 - SA研究課題の整理とプライオリティ付け
 - 1F事故の検討を通じて、ニーズと到達点とのギャップ分析を実施
 - OECD/NEAのWGAMA等国際機関の活動とも協力
- **SARPR** (**S**evere **A**ccident **R**esearch **P**riority **R**anking、2019) *ERMSAR2019, Prague, Log No.: 098*
 - NUGENIA TA2/SARNETの15機関の専門家によるSARPの見直し
 - 35課題： In-Vessel事故進展、格納容器破損(早期、晩期)リスク、FP放出と移行挙動、使用済み燃料プールでの事故、炉計装、熱力学データベース、等
 - 大きな修正は無いが、SA後の長期マネジメントに係る課題が加えられた
 - ソースタームに係る8件の課題(FPの放出や移行に係る現象)：
ソースタームへの酸化雰囲気(放射線照射の影響、等)、高温化学、格納容器内化学、の各影響、等

3. ソースターム研究の現状

ソースターム研究の計画検討(2/2)

原子力学会

- 部会によるロードマップの作成
 - 熱流動部会、核燃料部会、水化学部会
- 熱水カロードマップ(熱流動部会)
 - SAに関する詳細な技術マップの策定(2013)
 - 「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ2017(熱水力RM 2017) 28年度報告書」 http://www.aesj.or.jp/~thd/committee/TH-RM/TH-RM_r.pdf
 - SAの進展に伴って現れる様々なSA現象を素過程に分解して示し、それらに関する検討の到達点、解析コードやモデル開発等の現状とニーズや課題の分析に基づいたプライオリティ付け等を実施
 - ローリング: 2020年の春の完成を目指して改定の作業中

4. おわりに

ソースターム研究の課題

- TMI事故(1979)から40年を経て
 - 現象の理解と、より精確な評価に資するソースターム研究は、SA研究と表裏一体かつ、必要に応じて多様に進められ、現象のモデル化も進められた
- 1F事故 未解明事項の基礎的事項
 - 放射性物質の化学形態、移動挙動、圧力抑制プールのDF(除染係数～スクラビングによる)は取組まれており、今後、成果が期待される
- ソースターム研究の課題
 - OECD/NEA BSAFプロジェクトでは、1F事故の解析結果に大きなばらつきが見られ、SA解析コード(現象理解)における多くの残存課題が示唆された
 - 今後、OECD/NEA ARK-Fプロジェクトをはじめフォローアップの努力により、SA現象の更なる理解や解析精度の改善が期待される
 - ただし、安全評価、安全性向上評価、防災、安全目標等、研究が関わる安全上の重要な検討分野の全てに対して、**確実に実機適用性が図られる**ことがポイントであり、さらなるチャレンジが求められる

ご静聴、ありがとうございました
ご意見いただければ幸甚です