

核燃料部会セッション
「溶融事故における核燃料関連の課題検討ワーキンググループ活動報告」

溶融燃料サブワーキンググループ活動報告

電中研 尾形孝成

背景

- ◆1F1～3号機からの燃料デブリの取出しに向けて、格納容器内部の観察や炉内状況の推定など様々な現地作業や研究開発が進められている。
- ◆シビアアクシデント(SA)解析コードの開発・改良や模擬試験など、SA対策に関する新たな研究開発が国内でも始められつつある。
- ◆これらを効率的に進めるためには、SAに関する既往研究の成果を十分に活用することが重要。

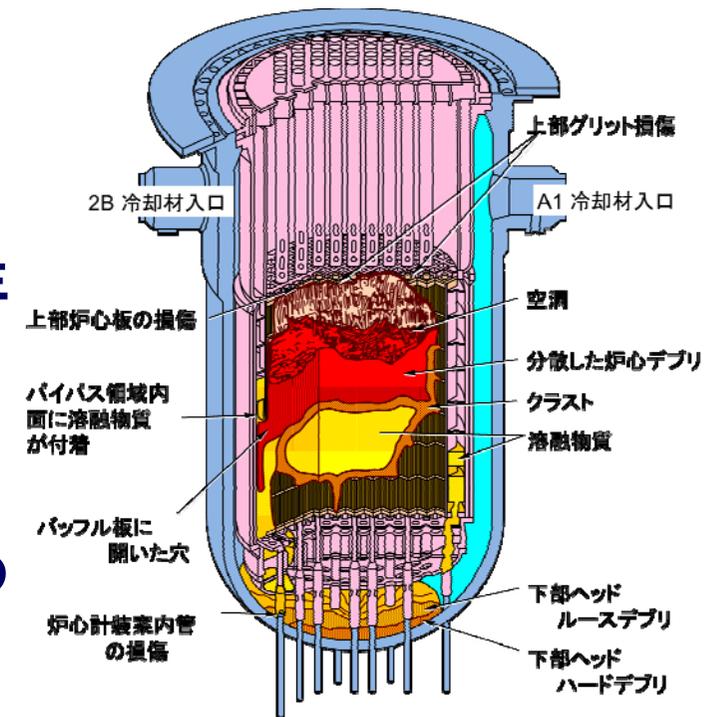
目的と活動計画

- ◆ 1F1～3号機の廃止措置や今後のSA対策に関する研究開発に対して基礎データを提供することを目的とする。
- ◆ SAに関する国内外の既往研究を調査し、SA事象進展、溶融燃料の生成過程と特性(組織、組成、物性など)、これらに影響を与える因子、およびモデリングの現状等について取りまとめる。
- ◆ 調査活動は2012年7月に開始、2013年度中頃に調査結果を取りまとめる予定。
- ◆ 国内の専門家によるレビューを受け、必要に応じて追加調査。
- ◆ SAに関する種々の研究に調査結果が活用されるように、報告書を公刊物として発行する計画。

SA事象推移の概要

◆シビアアクシデントの事象推移は、プラントや起因事象によって若干の違いがあるものの概ね次の通り。

- ① 崩壊熱により燃料棒の温度が上昇し、燃料棒、制御棒およびその他炉内構造材が相互に反応し、一部が溶融
- ② ジルカロイ被覆管と水蒸気との反応によって水素が発生するとともに、反応熱によって炉内の温度が急上昇
- ③ 構造材や被覆管の融点を超え、さらには燃料ペレットの溶解、溶融に至る。
- ④ 損傷が拡大して初期の形状を保持できなくなった炉心の内部では一定規模の溶融物のプールが形成
- ⑤ 溶融物が圧力容器底部に移行し、熱的・化学的な損傷によって圧力容器が破損すると、破損孔を通じて溶融物が流下、格納容器底部のコンクリートと反応



下部ヘッドへのリロケーション事象 (224分) 後の TMI-2 炉心状況図

R.K. McCardell, Nucl. Eng. Des. 118(1990) 441

調査の視点(例)

項目	TMI-2(PWR)	福島第一(BWR)	溶融燃料の特性・性状への予想される影響	
燃料・構造材	燃料構造	スペーサグリッド	チャンネルボックス	炉内にジルカロイ量が多く、溶融燃料中のZr濃度が高い。
	制御棒	Ag-In-Cd/SS被覆	B4C/SS被覆	ホウ素とFeとの共晶反応が貴金属FPの挙動に影響？ B4Cと水蒸気との反応によるCO ₂ やH ₂ ガス発生の影響は？
	燃料	UO ₂	Gdを含有、一部にMOX	MOXやGdは燃料デブリの性状等には大きく影響しない？
	燃焼度	運転開始後3ヶ月	新燃料～高燃焼度	溶融燃料中のFP量が多く、水の放射線分解に要配慮。
炉内構造	炉容器下部構造	炉心支持板、計装案内管など	炉心支持板、制御棒案内管/駆動軸など	炉容器下部構造の鋼材の量が多く、下部ヘッドの溶融燃料のFe濃度が高い。貴金属FPを多く取り込んでいる？
事象進展	溶融継続時間	1～2時間	数時間	炉内の溶融領域の割合が大きい？ 揮発性FPの放出が大？ 燃料デブリの一部が緻密化？ 溶融燃料の一部は圧力容器の下に落下、コンクリートと反応。
	圧力	>50気圧	大気圧～数気圧	圧力は冶金学的な反応には大きくは影響しない？
	海水注入	なし	炉心溶融後	海水成分の挙動は不明だが、冷却時や保管時のFPの浸出挙動や保管容器の腐食等に影響？ 溶融燃料の性状への影響は？
取出までの期間	事故発生から取出し完了までに10年	取出着手までに10年程度を想定		冷却期間が長期化すると燃料デブリの性状に変化？ FPの浸出に影響？

調査対象

◆シビアアクシデント事象進展に関する既往研究

- ① TMI-2事故： 事象進展、炉内物質の特徴、FPの挙動、炉内物質の取出しなど
- ② 炉内総合試験： STEP、ACRR-ST、ACRR-DF、PBF-SFD、FLHT、LOFT-FP、Phebus-SFD、Phebus-FPなど
- ③ 炉外総合試験： SANDIA-XR、CORA、QUENCHなど
- ④ 照射済燃料炉外加熱試験： ORNL-HI/VI、Heva、Vercors、VEGAなど
- ⑤ 溶融燃料挙動試験： RASPLAV、MASCA、MCCI関連試験、FCI関連試験など
- ⑥ 個別反応試験： Zry/構造材、Zry/UO₂、Zry/制御材、Zry/水蒸気、UO₂/構造材、UO₂/制御材、UO₂/水蒸気、制御材/構造材、制御材/水蒸気、構造材/水蒸気
- ⑦ SA総合解析コードおよび詳細解析コード
- ⑧ 関連する主要な物性値

◆SWGメンバーで分担して調査中

調査状況－炉内総合試験の概要

- ◆SA時の燃料破損・溶融進展過程やFP放出挙動などを調べるため、照射済燃料棒または集合体を炉内で加熱
- ◆SA時の事象進展の理解に寄与
- ◆TMI-2事故後の1980年代に多く、現在は実施されていない
- ◆PWRを模擬した試験が多く、B4C制御棒を使用した試験は2例のみ

試験名	TMI-2	PBF-SFD	STEP	ACRR-DF	ACRR-ST	NRU-FLHT	LOFT-FP	Phebus-SFD	Phebus-FP	ACRR-MP
施設	発電炉	PBF/INEL	TREAT/ANL	ACRR/SNL	ACRR/SNL	NRU/AECL	LOFT/INEL	Phebus/CEA	Phebus/CEA	ACRR/SNL
年代	1979	1982-1985	1984-1985	1984-1986	1985-1989	1985-1987	1984-1985	1986-1989	1993-2004	1989-1992
目的	-	燃料破損過程、FP放出	FP放出	燃料破損過程	還元雰囲気下でのFP放出	実長の燃料破損過程	初期の炉心損傷過程	初期の炉心損傷過程	後期の溶融進展過程、FP放出	後期の溶融進展過程
燃焼度	0.9 GWd/t	0-38 GWd/t	31-36 GWd/t	未照射	47 GWd/t	0-28 GWd/t	0.4-1.4 GWd/t	未照射	0-38 GWd/t	未照射
燃料棒本数	全炉心	28~32	4	9~14	4	11~12	11x11	21	20 (FPT4はデブリベッド試験)	UO ₂ /ZrO ₂ デブリベッド~3kg
制御棒	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd		Ag-In-Cd/B4C	なし	なし	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd/B4C	Ag, In
圧力	5-15 MPa	6.8-7.0 MPa	0.3-8MPa	0.7-2.0	0.2-2.0 MPa	1.4 MPa	0.3-1.4 MPa	0.5-3.5 MPa	0.2 MPa	0.1 MPa
最高温度	>3000 K	>2800 K	~2900 K	~2700 K	~2500 K	2300-2600 K	2400-3000 K	~2750 K	>2800 K	~3400 K

調査状況－炉外総合試験の概要

- ◆未照射の燃料棒または集合体を電気ヒータで加熱して、溶融進展挙動を調べる試験
- ◆CORA試験とXR試験ではB₄C制御棒を使用
- ◆CORA試験の後継としてQUENCH試験(被覆管のみ)が実施中

試験名	NIELS	CORA	SANDIA-XR
実施機関	KfK	KfK	SNL
年代	1982-1986	1987-1992	1993-1996
目的	初期の溶融進展過程	初期の溶融進展過程	BWRの金属溶融物の排出挙動
燃焼度	未照射UO ₂	未照射UO ₂	未照射UO ₂
燃料棒本数	1~9	25~59	64
制御棒	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd/B ₄ C	B ₄ C
圧力	0.1 MPa	0.2-1.0 MPa	0.1 MPa
最高温度	2523 K	2300~2500 K	~2300 K

調査状況－照射済燃料の炉外加熱試験

- ◆SA時のFP放出挙動を詳細に調べるため、照射済燃料のセグメントを炉外で加熱
- ◆HI/VI (ORNL)、Heva/Vercors (CEA)、VEGA (JAERI)
- ◆主なパラメータ：
温度、雰囲気(水蒸気/空気/水素/He)、圧力等、他
- ◆これまでに得られているデータ(例)

- ✓揮発性である希ガス、Cs、Iは同様の放出速度を示す
- ✓Te、Sbは揮発性と見なせるが、未酸化被覆管に一旦保持され、被覆管酸化時に放出される
- ✓これら知見のほか、燃料熔融の影響、雰囲気による放出挙動の違いなどについて低揮発性FPも含めてデータが得られている

調査状況－熔融燃料の挙動に関する試験

- ◆ 熔融燃料(コリウム)の下部ヘッドにおける挙動、冷却材との相互作用(FCI)、圧力容器との相互作用、コンクリートとの相互作用(MCCI)についても多くの研究例
- ◆ RASPLAV、MASCA、他：
コリウムと圧力容器との相互作用、下部ヘッドにおけるコリウムの熱流動・成層化などに関する試験
- ◆ FARO、KROTOS、ALPHA、COMET、他
コリウムが冷却材に注入された時の冷却・凝固挙動、水蒸気爆発の条件、凝固物の粒径などに関する試験
- ◆ SWISS、ACE/MACE、CCI、COTELS、VULCANO等々
コリウムとコンクリートとの反応生成物、コンクリートの種類、注水の影響、コリウムからの冷却速度、など

調査状況－個別反応試験

- ◆UO₂、ジルカロイ、構造材(SS、インコネル他)、制御材(Ag-In-Cd、B₄C、Hf)および水蒸気との反応は、SAの現象理解の基礎
- ◆各組合せに対して多くの研究が行なわれている。
- ◆1990年代にはB₄CとSSおよびB₄Cとジルカロイとの反応、2000年代からB₄Cと水蒸気との反応に関する研究
- ◆B₄Cと水蒸気との反応は複雑でガス発生を伴う



調査状況－SA解析コード

- ◆SA時の熱水力、溶融進展挙動、FPの環境への放出などを総合的に解析する総合解析コード：MAAP、MELCOR、THALES等
- ◆限定された現象を機構論的に解析する詳細コード：SCDAP/RELAP、ICARE、SAMPSON等
- ◆燃料破損挙動、溶融・凝固挙動、化学反応(発熱と生成物)、デブリベットの挙動、燃料-冷却材反応、FP放出などについて、現象の取扱い方(モデリング)、根拠となっている実験データ、改良の余地(課題)などを整理する予定

とりまとめの方針

- ◆ 1F事故の事象進展把握や今後のSA関連研究に役立つように、試験データや得られた情報などを整理
- ◆ 試験の動向やモデリングの現状を踏まえて、今後の課題を抽出
- ◆ 溶融燃料の物性値、種々の反応速度式など定量的なデータや評価式も整理

今後の課題(例)

- ◆ SA対策の強化に伴い、SAの各現象の理解の深化、現象のモデリングと解析コードの高度化が重要。
- ◆ そのためには、次の燃料・材料の化学的挙動について理解を深め、炉内外試験およびモデリングを行うことが必要。
 - 溶融前の燃料破損とペレット分散挙動、FP放出挙動(特に高燃焼度)
 - 制御棒崩落挙動
 - ステンレス、ジルカロイ、制御材、UO₂等の材料間の反応の進展挙動(雰囲気の影響など)
 - 溶融プールの成層化挙動およびFP放出挙動(雰囲気の影響、溶融コリウムの組成の影響など)
 - 溶融コリウム-コンクリート反応(広がり方、ガス発生量(H₂, CO, CO₂)、反応速度、冷却性、雰囲気の影響、溶融コリウムの組成の影響など)
- ◆ 上記の他、格納容器の損傷防止対策や使用済燃料貯蔵プールにおける燃料損傷防止などに関しても、対策の有効性実証や現象解明のための課題あり

溶融燃料SWGメンバー

鈴木嘉章(MNF)

工藤保・柴田裕樹(JAEA原科研)

三輪周平・浅賀健男(JAEA大洗)

草ヶ谷和幸(GNF-J)

木戸俊哉(NDC)

宇根勝巳(NFD)

大脇理夫(原燃工)

小澤正明(JNES)

大石佑治(阪大)

尾形孝成・中村勤也・園田健・太田宏一(電中研)

(順不同、敬称略)