

OECD SERENA 2004 年報告書について

2017 年 8 月 5 日

中西正之

1. 初めに

OECD（経済協力開発機構）は、原発にメルトダウンが発生した時、水蒸気爆発が発生し、格納容器に破損が生じると、水蒸気爆発によって大量に発生する核燃料の微粉が大量に大気中に放散され、放射性物質による耐えがたい大被害が発生する可能性が有るとし、(Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications)の頭文字を取った SERENA プロジェクトを開始しました。

最初のプロジェクトは、2002 年 1 月から始まり 2004 年にまとめの報告が行われました。

◆ IDENTIFICATION OF RELEVANT CONDITIONS AND EXPERIMENTS FOR FUEL-COOLANT INTERACTIONS IN NUCLEAR POWER PLANTS [末尾に参考文献を紹介 注 1]

原子力発電所における燃料 - クーラント相互作用に関する関連条件と実験の特定
SERENA Co-ordinated Programme (Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications)

このプロジェクトには世界各国の組織から参加が有りましたが、日本からは JAEA（日本原子力開発機構）と NUPEC（原子力発電技術機構）の二つの組織が参加しています。

ロシア連邦は、チェルノブイリの過酷事故で大変な目に合っているため、世界でも一番早くから過酷事故問題の研究や水蒸気爆発の研究を行っていたようです。

ヨーロッパやアメリカ、日本では、それよりも遅れて研究が始まったようですが、2000 年頃までには水蒸気爆発の研究は進んだようです。

この報告では、2000 年までに、各国で水蒸気爆発の研究が進んできていたが、まだ不確実な事が多く、新型炉の過酷事故対策の設計や、現在運転中の原子炉の過酷事故対策には不十分な到達でしかないため、国際的な SERENA プロジェクトを結成し、研究を進めることにしたと説明されています。

なお、ロシア連邦も SERENA プロジェクトに参加していると報告されています。しかし、ロシア連邦の水蒸気爆発の研究は、他国よりもかなり先行していたようで、この SERENA プロジェクトの中ではあまり報告がされていないようです。

◆ ロシア連邦の水蒸気爆発を含む過酷事故対策の研究は、ウラジミール・ベンジアノビッチ・カベンスキーが2009年に「SEVERE ACCIDENT MANAGEMENT CONCEPT OF THE VVER-1000 AND THE JUSTIFICATION OF CORIUM RETENTION IN A CRUCIBLE-TYPE CORE CATCHER」

（VVER-1000のシビアアクシデントマネジメント概念とるつぼ型コアキャッチャにおけるコリウム保持の有効性）を発表しており、その様子が良く分かります。

ロシア連邦の研究報告が少ない点を除くと、SERENA プロジェクトの報告は、かなり水蒸気爆発問題の世界的な知見を説明しているように思われます。

そして、日本でも有名になってきた韓国のTROI実験は、ロシア連邦の実験の再現から始まったようで、SERENA プロジェクトの重要な実験の一つです。

SERENA プロジェクトには、水蒸気爆発実験の分野と、水蒸気爆発実験結果によるシミュレーションコードの開発の分野があります。

日本の担当は、後者のシミュレーションコードの開発のようです。

なお、日本で加圧水型原発を所有する4電力会社（九電・関電・四電・北電）と原子力規制委員会の水蒸気爆発対策の見解は、SERENA プロジェクトの見解とは全く違うようです。さらに、ロシア連邦の水蒸気爆発を含む過酷事故対策の研究の総括的な報告と思われる、カベンスキーの2009年の「VVER-1000のシビアアクシデントマネジメント概念とるつぼ型コアキャッチャにおけるコリウム保持の有効性」の論文の見解とも全く違うようです。この事を、SERENA プロジェクトの報告から追跡していきたいと思います。

2. タスク1最終報告書より

OECD SERENA プロジェクトの最初の段階では、これまで世界各地で行われてきた水蒸気爆発実験の整理と評価が行われています。

水蒸気爆発には、原子炉压力容器内爆発、原子炉压力容器外爆発があり、また水中に溶融デブリが落下するときの水蒸気爆発と、溶融デブリ上に水が落下する場合があります。OECD SERENA プロジェクトでは、原子炉压力容器外で、水中に溶融デブリが落下するときの水蒸気爆発がメルトダウン発生時に最も危険性が大きいと考えられ、このケースを中心に検討が行われています。

OECD SERENA プロジェクトでは、

[これまでの世界中の水蒸気爆発の研究の到達点から、原発にメルトダウンが発生した時、格納容器内に大量の水が溜まってしまった時や、高温度の溶融デブリを水で冷却しようとした時に、格納容器内で大水蒸気爆発が起きて、格納容器が破損し、デブリダストが格納容器外に漏洩する危険性が大きく、現在の到達点ではそれらを防止するための適切な手段はまだ見つかっていないと。そのために、今 OECD SERENA プロジェクトが必要である。]

と考えています。

加圧水型原発を所有する4電力会社や原子力規制委員会の、[実炉では大水蒸気爆発は起こらない] との見解とは全く違います。

OECD SERENA プロジェクトは、大掛かりな水蒸気爆発研究の世界的な取り組みです。この報告書では、最初に「タスク1」のまとめが報告されています。

水蒸気爆発は、水中に落下した溶融デブリが粒状になり事前混合される過程と、粒状溶融デブリが内部トリガーや外部トリガーにより、廻りの水蒸気膜が剥がれて、粒状溶融デ

ブリと水が直接接触し、圧力波が発生し、粒状熔融デブリの廻りの水蒸気膜が剥がれて新しい圧力波を発生する連鎖反応が起きる爆発過程とが有ります。

試験中に水蒸気爆発が起きなかった実験でも、熔融デブリが粒状になり事前混合される過程のデータは貴重であり、試験中に水蒸気爆発が起きた実験のデータとも合わせて、事前混合の過程の解明が行われています。それから、水蒸気爆発が起きた時の状態の解明は、別の過程として実験による解明が行われています。

熔融デブリが粒状になり事前混合される過程と水蒸気爆発が起きる過程は、時間軸がけた違いに違うので、水蒸気爆発のシミュレーションコードの開発は別々に行われています。

事前混合の実験は、FARO 実験（欧州 JRC のイスプラ研究所における圧力容器対象実験）やプレミックス実験 PLEMIX-16 が評価されています。

事前混合の実験は、UO₂（二酸化ウラン）以外の疑似デブリで行ったものが多く、現在の実験データでは、事前混合のシミュレーションコードの開発には不足しており、UO₂ を含む疑似デブリを使用した実験が必要と報告されています。

水蒸気爆発実験としては、KROTOS 実験（欧州 JRC のイスプラ研究所における格納容器対象実験）、TROI 実験が評価されています。

しかし、「KROTOS では、水に入る前のジェットの高品質が悪いことが主な欠点です。TROI では、熔融温度に大きな不確実性が存在します。」との指摘が有り、OECD SERENA プロジェクトとしての今後の試験方法の改善が提案されています。

ただ、報告書は「既に実施されている TROI-13 は、自発的な蒸気爆発を発生させる原型のコリウムの能力に関する最初の情報を与える」とあり、自発的な水蒸気爆発を認めています。

OECD SERENA プロジェクトが始まる前の頃までは、トリガーを与えないで起きる自発的な水蒸気爆発は、UO₂ よりも融点の低い金属の模擬デブリや UO₂ よりも融点の低い Al₂O₃ の模擬デブリを使用した実験で起こっていました。

しかし、TROI-13 が行われた頃から、UO₂ を含む模擬デブリでも、トリガーを与えないで起きる自発的な水蒸気爆発が起きることが分かってきました。

3. 各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告 1

この報告書では、世界各国の OECD SERENA プロジェクト参加研究機関のタスク 1 の要旨報告が掲載されています。

OECD/NEA/CSNI（経済協力開発機構・原子力機関・原子力施設安全委員会）から報告される OECD SERENA プロジェクトの方針は、参加各国の研究機関の合意によるものなので、比較的に参加各国の研究機関の方針の平均値的なものになっているようです。

しかし、それぞれの国の研究機関の方針は、かなり異なっているようです。

【フランス】

各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告の一番目に、フランスの IRSN / CEA の報告が掲載されています。

フランスはKROTOS実験を行っている国でもあり、アレバ社がコアキャッチャの付いた欧州加圧水型炉 (EPR) を建設している国でもあり、水蒸気爆発には厳しい見解を取っています。

水蒸気爆発については、原子炉压力容器内の水蒸気爆発についても、原子炉压力容器外の水蒸気爆発についても十分に検討する必要があるとしています。

自発的な水蒸気爆発については、溶融物がピットの底部に接触するときに引き起こされることが有るとして、自発的な水蒸気爆発が有る事を認めています。

TROIの実験について注目しており、よりよい実験を提案しています。

【ロシア】

各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告の二番目に、ロシア連邦のEREC (ロシア連邦原子力安全機関のElectrogorsk研究・エンジニアリングセンター) の報告が掲載されています。

「ロシアにおけるFCIの調査は、主にVVER-1000キャビティの容器外FCIの分析に集中していた。VVER-1000はロシア製の加圧水型原子炉です。」とあります。(VVER-1000はコアキャッチャの付いた加圧水型原発で、ロシア連邦や中国やインドで既に実炉がたくさん運転されている事が知られています。)

そして、この報告では、FAROのプレミックス試験を1件紹介し、あとは世界中の参考文献の紹介のみ行っています。

すでにこの時期に、ロシア連邦は、自らの経験とその後の研究により、メルトダウンの発生時、キャビティ内の水蒸気爆発は極めて危険で、過酷事故対策はコアキャッチャで行うべしとの方針を取っていたようです。

【ドイツの報告①】

各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告の三番目にドイツのFZK(カールスルーエ工科大学)の報告が掲載されています。

「a) 早期封じ込めの失敗の結果である可能性のある超国家的大災害を考慮して、我々はこれが起こり得ないと最大限に保証しなければならない。低い確率では十分ではありません！」と説明されています。

また福島第一原発の過酷事故の発生の前の報告書ですが、ドイツの研究機関の過酷事故対策に対する厳密な姿勢が良く分かります。

压力容器内の水蒸気爆発についても、よく検討が行われており、压力容器内の水蒸気爆発は起こらないというような楽観的な見解については注意しないと説明しています。

压力容器外の水蒸気爆発については、よく研究を行ってきたようです。各国の研究機関が行っている水蒸気爆発実験について、未だ実験結果が不十分であり、もっと厳密な実験が必要と提言しています。

これら各国の研究機関の共通の見解は、原子炉容器内でも、原子炉容器外でも水蒸気爆発が起きたら、水蒸気爆発により発生するデブリ微粒子が漏洩し、住民に多大な被害が発

生する可能性が有るので、安易に水蒸気爆発は起こらないとの見解を持って、具体的な検討を放棄する事を厳しく戒めています。

日本の加圧水型原発を所有する4電力会社や原子力規制委員会の考え方とは全く違う事がよく分かります。

3. 各国の研究機関のタスク1の要旨報告2

【ドイツの報告②】

各国の研究機関のタスク1の要旨報告の四番目にドイツのシュトゥットガルト大学の報告が掲載されています。

この報告は、世界各国の水蒸気爆発の実験と研究の報告が詳しく検討されています。

この時点では、OECD SERENAプロジェクトのような国際のプロジェクトが無くて、それぞれ独自の研究機関が水蒸気爆発の実験と研究を行っており、詳しい報告も行われていないものも有ったようです。

シュトゥットガルト大学の研究組織は、各国の水蒸気爆発の実験と研究をかなり詳しく調査していたようで、それぞれの報告をかなり厳しい目で見ているようです。

このような状態から、OECD SERENAプロジェクトが生まれた事がよく分かる報告です。

この報告は非常に重要な提起がたくさん有るようです。溶融デブリが水中に落下した時、溶融デブリは粒状になって水中に拡散しますが、その時大量のボイド（蒸気の泡）が発生します。このボイドは水蒸気爆発の発生時、圧力波の伝播を阻害し、又水蒸気爆発の衝撃のクッションとなり、水蒸気爆発の衝撃力を弱くします。この報告は、このような水準の高い実験と解析の重要性も提起しています。

日本の加圧水型原発を所有する4電力会社と原子力規制委員会が、UO₂を含む疑似デブリを使用した実験で、外部トリガーが無い場合、水蒸気爆発が起きる起きない、の論議だけに終わっているのとは、全く水準が違うようです。

【日本】

各国の研究機関のタスク1の要旨報告の五番目に日本の日本原子力研究開発機構（JAERI）の報告が掲載されています。

この報告は2002年2月22日にOECD SERENAプロジェクトに提出されています。

この時期は、福島第一原発の過酷事故の発生よりも9年前であり、日本の原発にはメルトダウンは起こり得ないとの安全神話が行き渡っていた時期ですが、日本でも水蒸気爆発対策の問題を研究している事が報告されています。

はじめに、「日本では、2000年10月現在、23台のPWR（加圧水型原発）、Mk-I CV付きBWR（沸騰水型原発）15台、Mk-II CV 11台、ABWR（改良型沸騰水型原発）2台が運用されています」という日本の原発の実情を、OECD SERENAプロジェクトに報告しています。

そして、BWR Mk-IIプラントは、原子炉压力容器の下に大量の水を蓄えた圧力制御室があり、メルトダウンが起きて原子炉容器から大量の溶融デブリがペDESTAL（原子炉基礎）に落下し、ペDESTALの底のコンクリートを溶かして、その下部の大量の水を蓄えた圧力制御

室に落下すると大水蒸気爆発が起きる可能性が有り、日本でも水蒸気爆発の実験と研究は重要と説明しています。

日本原子力研究開発機構（JAERI）は統合シビアアクシデントコードTHALES-2を開発しており、日本の原発の水蒸気爆発問題の検討を行っている」と報告しています。

そして、BWR Mk-IIプラントの水蒸気爆発のシミュレーション結果を報告しています。

そのあと、日本原子力研究開発機構（JAERI）が世界各国の研究機関の水蒸気爆発の実験と研究の報告を参考にしているものを紹介し報告しています。

日本国内で、原子力の安全神話が猛威を振るっていた中で、水蒸気爆発の実験と研究を行い、OECD SERENAプロジェクトに参加したことはほめられて良い事だと思われま

す。しかし、第一から第四の報告に比べて、実験と研究の水準がかなり低いように思われます。

このことが、日本の新規制基準の策定時、水蒸気爆発対策が全くと言っていいほど採用されなかった遠因になったように思われます。

5. 各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告 3

【韓国の報告①】

各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告の六番目に韓国の KAERI（韓国原子力研究所）、KMU（韓国海事大学）、韓国（共同参加）の報告が掲載されています。

KAERI は TROI 実験を行った研究所で、水蒸気爆発の研究には力を入れているようです。

「韓国の原子力発電所の状況は、商業運転には 16 の原子力発電所（12 の PWR と 4 つの PHWR）があります。」と説明されています。

「セクション 1 では、重大な事故管理の観点から、韓国標準原子力発電所（KSNPs）と APR-1400（高度加圧水型原子炉 1400Mwe）のエネルギーFCI の関連する条件が特定されている。」と説明されているように、韓国では、アメリカのウェスティングハウス社の AP-1000 と同じような新世代原子炉 APR-1400 の開発が行われており、日本の原発よりも原発の開発は進んでいたようです。そして、そのために、TROI 実験を始めており、水蒸気爆発実験も日本よりは先行していたようです。

KAERI は、ヨーロッパで先行して行われていた水蒸気爆発実験は模擬デブリが Al2O3（酸化アルミニウム）で行われたものが多いが、実炉のデブリは UO2 が主体で、Al2O3 の模擬デブリと UO2 が主体の疑似デブリは物性が大きく違い、又その物性の違いが水蒸気爆発にどのような影響を与えるのかの解明ができていないので、Al2O3 の模擬デブリの水蒸気爆発実験は、実炉の水蒸気爆発の検討にはあまり役に立たないと考えたようです。

この点は、日本の加圧水型原発を所有する 4 電力会社や原子力規制委員会の考え方とよく似ています。

そして、KAERI は UO2 が主体の疑似デブリの実験に力を入れており、トリガーが無くても自発的な水蒸気爆発が起きる実験結果を得ています。ここについては、日本の加圧水型原発を所有する 4 電力会社や原子力規制委員会の見解と全く違います。

【韓国の報告②】

各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告の七番目に韓国のKINS（韓国原子力安全研究所）の報告が掲載されています。

この報告書の内容は、韓国の KAERI（韓国原子力研究所）、KMU（韓国海事大学）、韓国（共同参加）の報告とほとんど同じものです。

【アメリカ】

各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告の八番目にアメリカのNRC（アメリカ合衆国原子力規制委員会）の報告が掲載されています。

この報告には、NRCの独自の水蒸気爆発実験の報告は有りません。NRCは水蒸気爆発の見解は説明しています。

これまでの各国で行われた実験は、FARO実験、KROTOS実験、TROI実験について、見解を説明しています。

これまでの水蒸気爆発実験と研究は、論文などで発表されている情報から考察されてきて、不十分なものになっている。OECD SERENAプロジェクトのような、国際的なプロジェクトが必要と説明しています。

FARO実験は先行して行われており、試験に使用した溶融物の重量も多く、貴重なデータが得られているが、水蒸気爆発を解明するためにはまだまだ不明な事が多いと説明されています。

KROTOS実験は精密な実験が行われたが、試験に使用した溶融物の重量が少なく、実炉の水蒸気爆発を解明には相関性に劣ると説明されています。

TROI実験は遅れて始められたが、溶融物の重量がある程度有り、又溶融物がZrO₂やUO₂+ZrO₂の試験をたくさん行っており、実炉の条件に近いと評価しています。また、UO₂を主体とする疑似デブリで外部トリガーの無い条件で初めて水蒸気爆発を観測できたとして、評価しています。

ただ「報告された報告書によると、初期条件と境界条件の特性評価レベルはそれほど良好ではありません。例えば、報告された溶融温度は、非常に高い過熱度を有するようである。しかし、温度測定の不確かさも非常に大きい場合があります。」と報告されており、試験の未熟さも指摘されています。

【フィンランド】

各国の研究機関のタスク 1 の要旨報告の九番目にフィンランドのVTTの報告が掲載されています。各国の研究所の水蒸気爆発実験を整理しています。

この報告は、各国の研究所のタスク 1 の最後の報告です。

◆参考文献

[注 1] IDENTIFICATION OF RELEVANT CONDITIONS AND EXPERIMENTS FOR FUEL-COOLANT INTERACTIONS IN NUCLEAR POWER PLANTS

<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2004/csni-r2004-7.pdf>