

# 「原子炉重大事故現象学に関する SARNET 講義ノート」について

福岡核問題研究会 2024年3月例会資料  
2024年3月23日  
中西正之

## 1. はじめに

2008年付の「SARNET Lecture Notes on Nuclear Reactor Severe Accident phenomenology」のPDF資料がインターネットに公開されています。

[Cours Sarnet sur les phénomènes accidents graves de réacteurs nucléaires.](#)  
[Sarnet lecture notes on nuclear reactor severe accident phenomenology.](#)  
[\(iaea.org\)](#)

PDF資料は、「Nuclear Safety in light Water Reactors (Severe Accident Phenomenology)、「軽水炉における原子力安全性（シビアアクシデント現象論） Edited by Bal Raj Sehgal」2012年発行の有名な書籍の、先行発表資料と思われま

す。  
2012年発行の書籍は、福島第一原発の2011年3月のメルトダウン事故発生後に発行されており、これまで特にヨーロッパの原子力界を中心にして検討されてきた軽水型原発のメルトダウン事故の予測と対策が、実際にはどうなったかが幾らかは分かっていた状態の中で、その検証を含めてまとめられているようです。

そして、その書籍の冒頭で『軽水炉過酷事故の安全性研究の分野で達成された進歩を本の形で文書化するというアイデアは、フランス IRSN が調整するシビアアクシデント研究ネットワーク オブ エクセレンス（SARNET）の研究プログラムの開発中に生まれました。欧州委員会の第6次枠組み研究プログラムの後援のもと、2004年3月に開始されました。議論の結果、この本はハンドブックではなく、その分野の学生や若い研究者のための教科書であるべきであると決定されました。』と説明されています。

また、2008年付で発行されているこのPDF資料は、福島第一原発の2011年3月のメルトダウン事故発生の直前に行われており、この時期には既に1979年3月にスリーマイル島原発でメルトダウン事故が発生し、1986年4月には旧ソ連のチェルノブイリ原発でメルトダウン事故が発生していま

す。

そして、これらの原発のメルトダウン事故を経験し、アメリカやヨーロッパやロシアでも軽水炉におけるシビアアクシデントに関する研究が非常に熱心に始まったと思われます。

初めは、一番早く軽水商用炉の開発に成功し、大量の軽水商用炉建設を始めたアメリカでシビアアクシデントに関する研究が大量に始まったようです。

しかし、スリーマイル島原発のメルトダウン事故は、事故により発生した核燃料の超高温で溶融コリウムが、原子炉圧力容器内で留まり、格納容器内までには漏洩しなかったため、メルトダウン事故が発生しても、放射性廃棄物の大気中への漏洩や地下水への漏洩等には殆ど大きな影響は無かったため、アメリカのシビアアクシデントに関する研究はあまり深刻なものにはならなかったようです。

ところが旧ソ連のチェルノブイリ原発でのメルトダウン事故は、アメリカやヨーロッパで多く建設されるようになってきた格納容器が設置された加圧水型原発や沸騰水型原発とは基本設計が大きく異なる特殊な原発で、メルトダウン事故により、溶融コリウムから放出された放射性物質が直接大気中へ大量に飛散するような状態になり、旧ソ連やヨーロッパ地域の大气中に飛散した大量の放射性物質により大変な被害が発生しました。

そのため、特にヨーロッパ地域やロシアは、アメリカ以上にシビアアクシデント現象の研究と、その対策の研究を熱心に始めたと思われます。

しかし、対象となった原発と同じ基本設計の福島第一原発に海外では大きく心配されていたメルトダウン事故が発生するまでは、ヨーロッパやロシアの理論も予測だったので、どこまで予測が到達されていたのかは重要な課題と思われます。

## 2. 第1章 軽水炉 (LWR) の安全性 - 歴史的考察 (前半)

「SARNET Lecture Notes on Nuclear Reactor Severe Accident phenomenology」の資料は、PDF形式で425ページ分あり、大量の資料となっています。

一方「Nuclear Safety in light Water Reactors (Severe Accident Phenomenology)」、「軽水炉における原子力安全性 (シビアアクシデント現象論) Edited by Bal Raj Sehgal」2012年発行の有名な書籍は、714ページ分あります。

この書籍は国会図書館か全国の7大学の図書館や研究所で閲覧を行っている程度で、また高価な書籍なので自由に閲覧することはかなり難しいようです。

そのため、自由に閲覧できる「2008年付の SARNET Lecture Notes on

Nuclear Reactor Severe Accident phenomenology」のPDF資料は非常に貴重な資料と思われます。

この詳細な報告書の第1章は、1ページから70ページまでに示されており、B. R. Sehgalの編集で、「Light Water Reactor (LWR) Safety - A Historical review、(軽水炉(LWR)の安全性 - 歴史的考察)」となっています。

2008年発行の報告書ですから、福島第一原発のメルトダウン事故に関するものについては、全く報告はされていません。

しかし、原発の軽水炉が最初にアメリカで開発され、同時に商用原発でメルトダウン事故が発生した場合には、大変な被害が発生することも分かっていたので、当初のシビアアクシデントの研究とその対策の体系化はアメリカで行われ、ヨーロッパではそれらを非常に参考にしながら、追加研究がアメリカ以上に熱心に始まったことが詳しく報告されています。

日本でも、商用原発の導入と同時に国立の原子力研究所などでは、シビアアクシデントの研究を始めたようですが、アメリカに比べてもかなり遅れており、ヨーロッパよりはるかに遅れたようです。また、原発を所有する電力会社や原発の規制機関にはシビアアクシデントの研究にはあまり関心が無かったようです。

そのことが、福島第一原発のメルトダウン事故発生の大きな遠因になったようです。

アメリカは、最初の原子爆弾の開発と、原子力の平和利用との口実の商用原発の開発にあたって、軍事機密の保持とともに、商用原発の巨大な危険性についてもよく分かっていたようです。

そして、1-4ページの第1章の4. **Early Safety Assessments** (早期の安全性評価)の項目で、『原子力発電所の保険法にデータを提供するために、「最悪の場合」の原子力事故の影響を推定するという明白な目的で実施された研究 WASH-740 で「最悪の場合 500MWe 原子炉の放射性物質の50%が大気中に放出され、同時に最も不利な気象条件が蔓延すると想定した。彼らは、最大で 34,000 人の死者、43,000 人の負傷者が発生し、240,000 平方キロメートルの土地が汚染される可能性がある」と推定した』と報告されています。

一方、1-5、1-6ページの5.1. Assumptions and Requirements of TID-14844 and 10 CFR 100 (TID-14844 および 10 CFR 100 の前提条件と要件)の項目で『・格納容器の漏れ率は1日あたり0.1%。大気中の放射性核分裂生成物の輸送は次の条件下で行われると仮定されました。・・・

・立ち入り禁止区域の境界での2時間の曝露の場合、最大全身線量は25レム、甲状腺線量は300レム。

・LPZの外側境界での30日間または無限被ばく、最大全身線量は25レム、

甲状腺線量は 300 レム。・・・』

このように、説明されていますが、アメリカでは極めて初期には、商用原発のメルトダウン事故により、大変な被害が出るとの算定も行われたようですが、その後メルトダウン事故による放射性物質の大気中への推定飛散量は、あまり多いものではなく、立入禁止区域と低人口区域（LPZ）の設定を行えば、メルトダウン事故が発生しても、周辺の住民の安全は確保できると考えるようになったようです。

### 3. 第1章 軽水炉（LWR）の安全性 - 歴史的考察（後半）

6項で「安全理念」が報告されており、6. 1項で「深層防護のアプローチ」が説明されています。

世界の中でアメリカの商用原発が先行して開発され、商用原発の発注が大量に行われ始めたとき、商用原発の持っている巨大な危険性も非常に重視され、USACE（米国原子力委員会）の規制部門が中心となって、3層の深層防護の安全対策が強力に開発されたようです。

7項では「安全設計の基本」が報告されており、7. 1項で「LOCAとECCSの論争」が説明されています。

アメリカでは、商用原発の実証炉の開発が成功し、商用原発も小型炉から大型化が進み始めたと同時に、原発事故の心配も大きくなってきたようです。

そして、原子炉圧力容器と発電用タービンの間を循環する1次冷却水配管や2次冷却水配管の破断による冷却水の漏洩による消失のLOCAの発生により、原子炉内の冷却水が消失し、核燃料の冷却が出来なくなり、核燃料が熔融するメルトダウン事故が一番恐れられました。

そのため、LOCAの発生時に原子炉炉心に冷却水を供給するECCS（緊急炉心冷却装置）の開発が緊急の課題として行われました。

原子炉内の冷却水の消失時には、高圧水蒸気の発生があり、開発を始めた時期にはなかなかLOCAの発生時に原子炉炉心に冷却水を供給する実験は困難を極めたようですが、様々な努力の結果、ECCSの開発はアメリカで成功したようです。

8項では「原子力発電の公衆リスク」が報告されています。

「原子力発電の公衆リスク」は、商用原発の開発が一番早かったアメリカで検討が始まって、報告書も提出されていましたが、イギリスなどでも報告書が出され始めていたようです。

8. 1項で「原子力安全性研究（WASH-1400）」が報告されています。

アメリカでは、1974年に米国原子力規制委員会（USNRC）が設立され、マサ

チューゼツ工科大学のノーマン ラスムッセン教授の指導の下、ソウル氏の非常に有能な支援を得て、原子炉安全研究 (RSS) と名付けられたこの研究から、報告書 WASH-1400 として発表されています。

WASH-1400 は、確立論を大幅に適用し、イベントツリー手法により、原発のメルトダウン事故の発生の分析と、その事故防止対策の有効性を詳細に報告していました。

そして、ヨーロッパのドイツなどでも、WASH-1400 の報告書を参考にして、原発のリスク研究が発表されました。

9 項では「TMI-2 事故」が報告されています。

アメリカでは、WASH-1400 の報告書で、商用原発のメルトダウン事故の発生原理やその事故対策が詳細に検討され、広く周知されていたようです。

しかし、WASH-1400 の発行から 4 年も経たないうちに、スリーマイル島原発のメルトダウン事故が発生しました。

そして、スリーマイル島原発のメルトダウン事故が発生してみると、WASH-1400 の報告書が予測していた以外の項目がかなり大量にあったことが分かったようです。

ただ、スリーマイル島原発のメルトダウン事故により、原子炉压力容器内での核燃料の溶融に付いての挙動に付いては、予測されたものに対して、実際の進行がその後の解体調査まで含めて検討され、詳しく分かって今後の大きな参考になったようです。

しかし、メルトダウンした溶融デブリが原子炉压力容器内に留まり、格納容器底部のコンクリート床へへの落下が無かったことや、格納容器内での水素爆発は発生したが、その爆発圧力が最高で 2 b a r までで、加圧水型原発の比較的には頑丈な格納容器構造に起因して、格納容器破損が起こらなかったことにより、スリーマイル島原発からの放射性物質の大気中への飛散はほんのわずかにとどまりました。

そして、そのことがアメリカの原子力界のメルトダウン対策が比較的になくなった遠因となったようです。

9. 2 項では「チェルノブイリ事故」が報告されています。

チェルノブイリ原発のメルトダウン事故は、旧ソ連圏内のチェルノブイリに設置されていた特殊な原発において発生しており、事故発生当時はアメリカやヨーロッパや日本では直ぐには事故の詳細は分からなかったようです。

しかし、しばらくたって、旧ソ連から I A E A の事務所に事故報告が行われ、初めてその詳細が分かったようです。

チェルノブイリ原発は、旧ソ連で独自に開発されており、アメリカやヨーロッパや日本で建設されてきた加圧水型原発や沸騰水型原発とは基本設計が全く

異なる原発なので、従来世界で検討されてきた商用原発の安全対策とは大きく異なるものでした。

そして、チェルノブイリ原発のメルトダウン事故は、スリーマイル島原発のメルトダウン事故とは比較にならないほどの激しい原発事故になりました。

チェルノブイリ原発には、格納容器が基本設計で取り付けられていなく、また黒鉛減速原発であったため、WASH-740 で予測されていた条件に比較的近いような事故の発生となったようです。

ただ、事故の発生後の、対策においては人的に大きな犠牲を払い、強力な事故対策が行われたようです。

そして、後で発行された「Nuclear Safety in light Water Reactors (Severe Accident Phenomenology)」、「軽水炉における原子力安全性（シビアアクシデント現象論） Edited by Bal Raj Sehgal」では、福島第一原発のメルトダウン事故は、チェルノブイリ原発のメルトダウン事故に比べると、住民の直接の被害は非常に少なかったと報告されています。

#### 4. 軽水炉の水蒸気爆発

第6章は166ページから193ページまでに示されており、D. Magallonの編集で、「Steam Explosion in Light Water Reactors（軽水炉の水蒸気爆発）」となっており、極めて貴重な報告があります。

福島第一原発のメルトダウン事故の発生により、日本でも原発の過酷事故の危険性が極めて大きいことがよく知られるようになりました。

しかし、それでも日本政府は国内の原発の運転は継続するとの基本方針を定め、急遽原子力規制庁と原子力規制委員会が設立され、短期間に新規制基準が策定されました。

所が、新規制基準は、IAEA等が定めているような国際的な安全基準ではなく、福島第一原発のメルトダウン事故でその当時判明した事故の進展についての一時的な対処対策に限られたものに成っていました。

そのために、水素爆発対策については、新規制基準が策定されましたが、水蒸気爆発対策については、対策の条項は策定されませんでした。

そのため、加圧水型原発を所有する4電力会社は2013年7月時の「新規基準への適合性に係る申請書」において、MCCI対策はメルトダウン発生時には格納容器下部のキャビティに緊急に大量の貯水を行ない、その対策としました。

しかし、新規制基準適合性に係る審査会合が始まると、原子力規制委員会と規制庁の担当官側からこのような対策では、水蒸気爆発の危険性が有るのではないかとの批判が提出されました。

そこで、加圧水型原発を所有する4電力会社は、2013年12月17日の第58回審査会合において、「資料2-2-6 添付2 熔融炉心と冷却水の相互作用について」の資料を提出し、格納容器の破損につながるような水蒸気爆発は起こらないと主張しました。

この4電力会社の主張に対し、その後の新規制基準適合性に係る審査会合でも、規制側は問題の指摘を行っていましたが、適合性審査を優先した川内原発の適合性審査が審査開始後丸1年間過ぎたという事のように、審議の途中で審査終了とし、水蒸気爆発は発生しないことを認定しました。

この当時は、これらのやり取りを見ていて、これらの方針は、加圧水型原発の製造据え付けを行った三菱重工業と4電力会社との共同で作りに出した奇策のように思われました。

所が、第6章を調べてみると、この問題は既に2008年には世界の原発の過酷事故の最大の問題になっており、多くの報告が行われていたことが分かりました。

原発にメルトダウンが発生し、超高温度になった熔融コリウムが原子炉圧力容器の底部を破り格納容器下部に落下すると、これまでに建設されてきた商用原発の格納容器下部の床がポルトランドセメントコンクリート製のため、チャイナシンドロームとして既に一般市民にも知られていたMCCI（コアコンクリート反応）が起きて、大変な被害が発生することが既に分かっていました。

そのために、格納容器を損傷するような水蒸気爆発は起こらないのでメルトダウン発生時には、格納容器下部には大量の貯水を行ない、MCCI対策を行うという強固な方針もアメリカのウエスチングハウス社を中心にして長い間維持されてきたようです。

また、ウエスチングハウス社は、新型原発には、コアキャッチャーの取付は行わず、原子炉圧力容器を外部から水冷する簡便対策で、AP1000の新型炉の基本設計を行ないました。

ただ、原発の水蒸気爆発対策を有効に行うため、世界的には水蒸気爆発の研究が熱心に行われました。

この報告では、初めにKROTOSの水蒸気爆発実験がかなり詳しく報告されており、世界的な水蒸気爆発実験で分かってきた水蒸気爆発のメカニズムが詳しく説明されています。

そして、186ページからはOECD SERENA プログラムのことが報告されています。

この時期ですから、(SERENA フェーズ1) のみの報告となっています。OECD SERENA プログラムの項では、KROTOS実験とTROI実験の結果が報告されています。



そして、190ページに示された9. Conclusions (結論)では、「格納容器内での水蒸気爆発により、格納容器に致命的な破壊が起きることは無いことはこれまでの研究と検討では結論付けることはできなく、依然として大きな危険性が有ることは現在の考えられている対策の範囲では否定できない。」と説明されています。

また、ウエスチングハウス社もAP1000には、見切りをつけたようで原子力製造部門は手放し、一時期そのウエスチングハウス社の原子力製造部門を東芝社が購入したために、東芝社は倒産をしかけて、慌ててそれを手放しています。

そして、今第58回審査会合の「資料2-2-6 添付2 熔融炉心と冷却水の相互作用について」の資料とこの第6章を比較してみると、4電力会社の提出した資料が、世界的な水蒸気爆発研究の内容を捻じ曲げて作成されていた事が極めて明確に確認出来ます。

## 5. 熔融炉心とコンクリートの相互作用とベースマットの挙動

第7章は194ページから216ページまでに示されており、「**Molten Core-Concrete Interaction and Basemant Behavior** (熔融炉心とコンクリートの相互作用とベースマットの挙動)」となっております。

この報告書は、フランスの原発研究所の研究者とドイツの原発研究所の研究者の共著で作成されたようです。

MCCI (コアコンクリート反応)は、1979年3月に発生したスリーマイル島原発のメルトダウン事故の発生時、既にチャイナシンドロームとして一般にも知られていました。

しかし、スリーマイル島原発のメルトダウン事故では、熔融コリウムは原子炉圧力容器内に留まったので、MCCIは全く発生しませんでした。

また、1986年4に発生したチェルノブイリ原発事故では、熔融コリウムは下部のコンクリート床上には落下しましたが、地下水の放射性物質による汚染を恐れて、突貫工事で原子炉の真下にトンネルを掘り、その中にコアキャッチャーが仮設され、しかもそのトンネルまでには熔融コリウムは到達しなかったため、MCCIによる地下水の放射性物質による汚染は全く発生しませんでした。

また、この報告書は、福島第一原発のメルトダウン事故が発生した2011年3月よりはいくらか前の2008年付で発行されています。

そのため、将来世界の原発で、大規模なMCCIが発生しないための、予測研究の報告でした。

最初にMCCIの原理の説明が行われています。



そのあと、初期に行われた5件のMCC I実験と、最近行われた5件のMCC I実験が簡単に報告されています。

ここでは、最近行われた5件のMCC I実験の3番目に、日本の原子力発電技術機構（NUPEC）がNNC（カザフスタン国立原子力センター）の実験設備を借りて行ったCOTELS実験も紹介されています。

MCC I実験の簡単な報告の後、それらの実験結果を基にして開発されたMCC Iのコード（コンピューターのシミュレーションプログラム）の簡単な説明が行われています。

古典的なコードとして、CORCONとWECHSLが簡単に説明されています。MCC Iに付いては、この報告ではあまり詳しい説明は行われていないようです。

8章は、217ページから234ページに示されており、「Corium Spreading（コリウム拡散）」となっており、第7章と同じ著者たちで作成されたようです。

この実験と研究は、EPRのコアキャッチャーのような、メルトダウン事故発生時の格納容器底部コンクリートの保護設備の開発を目的として行われていると説明されています。

始めに「傾斜面上の流体の広がり、火山溶岩について徹底的に研究されています」と説明されています。

これらの先行研究を参考にして、傾斜面におけるコリウムの拡散実験と研究が始まったようです。

表Iには、5件の様々な物質を使用した拡散実験の報告が示されています。表IIには、疑似コリウムに特化した超高温拡散実験の報告が示されています。

この報告の中には、よく知られているVULCANOの1900℃から2700℃までの超高温拡散実験も含まれています。

そして、これらの拡散実験を基にして、コリウム拡散のシミュレーションプログラムが開発され、その5本のコードが表IIIに示されています。

これらのコードを使用して、EPRのコアキャッチャーの基本設計が行われたようです。

## 6. ソースターム：一次システムでの輸送と封じ込め

第9章は235ページから259ページまでに示されており、「Source Term: Transport in Primary System and Containment（ソースターム：一次システムでの輸送と封じ込め）」となっております。

また第10章は、260ページから279ページまでに示されており、

「Source Term Transport in Primary System and Containment Chemical

Processes and Mitigation Measures (ソースターム 一次システムでの輸送と封じ込め 化学プロセスと緩和策)」となっております。

ソースタームは、一般にはあまり知られていない単語のように思われますが、原発関係においては、原発に過酷事故が発生したとき、原発設備から大気中などの環境に放出された放射性物質または有害物質の量を示すと説明されています。

ソースタームは、日本では[JAEA-Research 2007-072 (軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価) 2007 年8 月]の報告書で、格納容器内の大規模水蒸気爆発の発生時、プルトニウムを含む放射性重金属の超微粉が大気中に大量に飛散する可能性が有ることが報告されています。

しかし、この報告はその件については触れてはいません。ただ、この「SARNET Lecture Notes」報告は、福島第一原発のメルトダウン事故が発生するより少し前のものなので、次に世界で発生するメルトダウン事故は、スリーマイル島原発のメルトダウン事故よりも、少し小規模か、または少し大規模かの予測が強かったようです。

そして、その場合格納容器から放射性ヨウ素や放射性セシウムが大気中に大量に放出される可能性が有るので、それらについていかに少なくするかが、非常に熱心に実験や研究、検討が行われており、詳しい報告が行われています。

原発にメルトダウンが発生すると、核燃料は超高温度になり、熔融も起こります。

この時、使用中の核燃料には揮発温度が低いものから高温までの様々な放射性物質が含まれており、それぞれの温度でガス化し、核燃料棒や原子力圧力容器から格納容器内に大量に漏洩します。

しかし、これらの放射性物質ガスは、格納容器内のシャワーやベント設備に設置されているフィルター設備などで捕捉できると思われるので、それらを捕捉する様々な検討が行われています。

また、それらの挙動を解析するための実験やシミュレーションプログラムの開発が大量に行われています。

そして、ヨーロッパの原発のソースターム対策はかなりできているので、福島第一原発で発生した大規模なメルトダウン事故と、放射性物質の大気中への大量の放出はヨーロッパの原発ではめったには起こらないと考えられていたようです。

## 7. レベル 2 PSA 及び原子力発電所の環境への影響と人の健康リスクの評価

第 11 章は 280 ページから 307 ページまでに示されており、「Level 2

PSA: Principles and Overview of Practices (レベル 2 PSA: 原則と実践の概要)」となっております。

この報告は、イギリスとフランスの研究者によっておこなわれているようです。

確率的安全評価 (P S A) は、最初は軽水商用炉の建設が先行したアメリカで開発や実行が進んでいたようです。

しかし、ヨーロッパでも P S A の使用は進んできたようで、原発の安全対策の検討や、新型原発の新規基本設計などで、強力な手段に成長してきたようです。

ただ、ここでは説明がありませんが、日本では P S A は、原発の安全神話の基本として悪用された点もあったと思われます。

第 1 2 章は 3 0 8 ページから 3 1 9 ページまでに示されており、「Safety assessment - NPP environmental impact and human health risk assessment (安全性評価 - 原子力発電所の環境への影響と人の健康リスクの評価)」となっております。

この報告はブルガリアの研究者によっておこなわれているようです。ATOMICA 原子力百科事典によると、『ブルガリア唯一の原子力発電所であるコズロドイ原子力発電所は、旧ソ連型 PWR (VVER) で 44 万 kW4 基と 100 万 kW2 基で構成されている。1~4 号機が VVER-440 の第一世代炉であるため、西欧諸国から安全性が疑問視されて早期閉鎖を求める声があがっていた。これを受けて、ブルガリア政府は 1999 年 11 月に 1~4 号機を早期閉鎖することで欧州委員会 (EU の執行機関) と合意し、1・2 号機は 2002 年 12 月末に、3・4 号機も欧州連合 (EU) 加盟前の 2006 年 12 月末に運転を停止した。』と説明されています。

ブルガリアは、旧ソ連陣営の国で、原発も旧ソ連の原発を設置しているようです。ただ、旧ソ連陣営も、チェルノブイリ原発のメルトダウン大事故を経験し、アメリカよりは原発の安全対策には慎重になっているようですが、それでも EU に比べると安全対策は緩かったようです。

しかし、ブルガリアは EU に加盟するために、2008 年においても、原発の安全対策には厳しく望み始めたようです。

一方、日本の原発の安全対策は、アメリカに比べても非常に緩く、世界一原発の安全対策に緩い国だったようです。

また、日本の新規規制基準は、原発の安全対策に非常に緩く、今でも日本は原発の安全対策に世界でも一番緩い国のようです。

第 1 3 章は 3 2 0 ページから 3 4 5 ページまでに示されており、「Mitigation concept: Current PWR plants A focus on French Plants (緩和コンセプト: 現在の PWR プラント フランスのプラントを中心に)」となっております。

この報告はフランスの研究者によっておこなわれているようです。ATOMICA 原子力百科事典によると、『天然資源に乏しいフランスは、1973年の第一次石油危機を契機に原子力開発を加速した。2017年1月末現在、運転中の原子力発電所は58基、6,313万kW、アメリカに次いで世界2位の座を占める。総発電電力量に占める原子力シェアも例年75%を越え、世界的にも第1位である。炉型は加圧水型軽水炉（PWR）に一本化された上、標準化が進んでいるため、発電コストは安く、余剰電力は欧州近隣各国に輸出している。』と説明されています。

この報告でも、フランスのPWR（加圧水型原発）と限定して、フランスの原発のメルトダウン事故発生に対する、徹底した事故の緩和策が説明されています。

フランスの原発は、既にコアキャッチャーの標準し、二重格納容器等強力な過酷事故対策を行った新型原発EPRの開発が行われています。

しかし、これまで建設が続けられた原発でも、シビアアクシデントのマネジメントシステムなどのソフトウェア対策の強化、砂床フィルターを使用したベント用フィルターの採用やMCCI対策を考慮した格納容器床構造の採用、等のハードウェア対策の強化等、メルトダウン事故発生に対する、徹底した事故の緩和策が行われてきたことが説明されています。

フランスのメルトダウン対策は、アメリカのメルトダウン対策に比べて相当厳しいようで、日本のメルトダウン対策とは比較にならないものだったようです。

## 8. 容器外コリウム保持の概念

第14章は346ページから360ページまでに示されており、「Ex-Vessel Corium Retention Concepts（容器外コリウム保持の概念）」となっております。

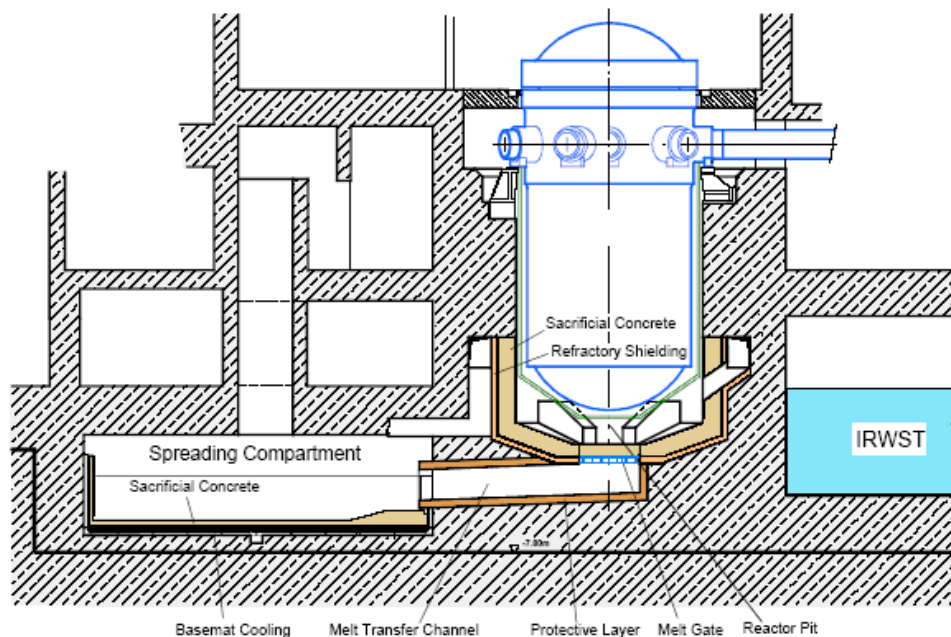
この報告は、フランスの研究者によっておこなわれているようです。始めに、ヨーロッパやロシアにおいて、大型原発においては、アメリカのウェスチングハウス社が行った圧力容器内コリウム保持のメルトダウン対策は確実な方法では無いと考え、ヨーロッパは容器外コリウム保持のEPR炉、ロシアは容器外コリウム保持のVVER-1000-91/99の開発が行われたと説明されています。

そして、この講義ではコアキャッチャーを中心に説明するとあります。

またFZK（カールスルーエ研究センター）によって提案され、テストされているCOMETコアキャッチャーのコンセプトもここで紹介されますとあります。

2. の項目でEPRの説明が行われています。

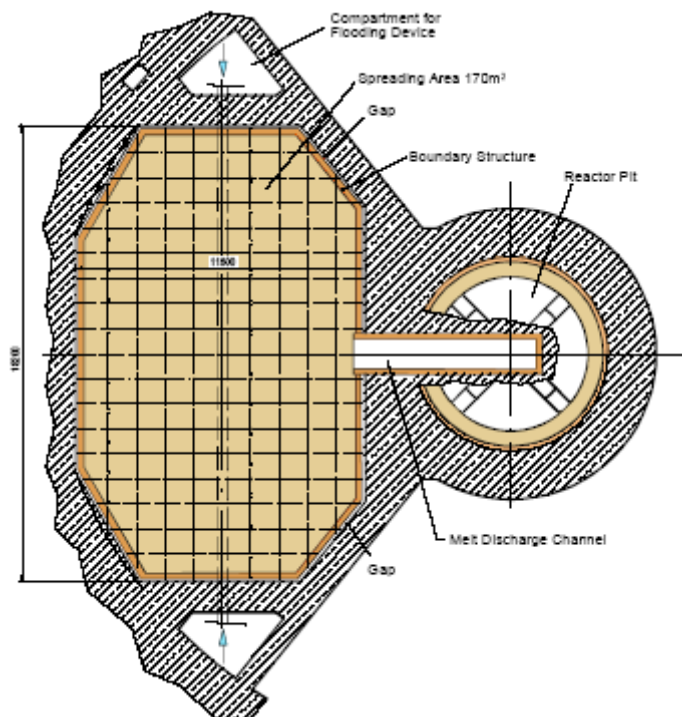
EPRの新型原発はフィンランドのオルキロイト原発で建設中で、フランス



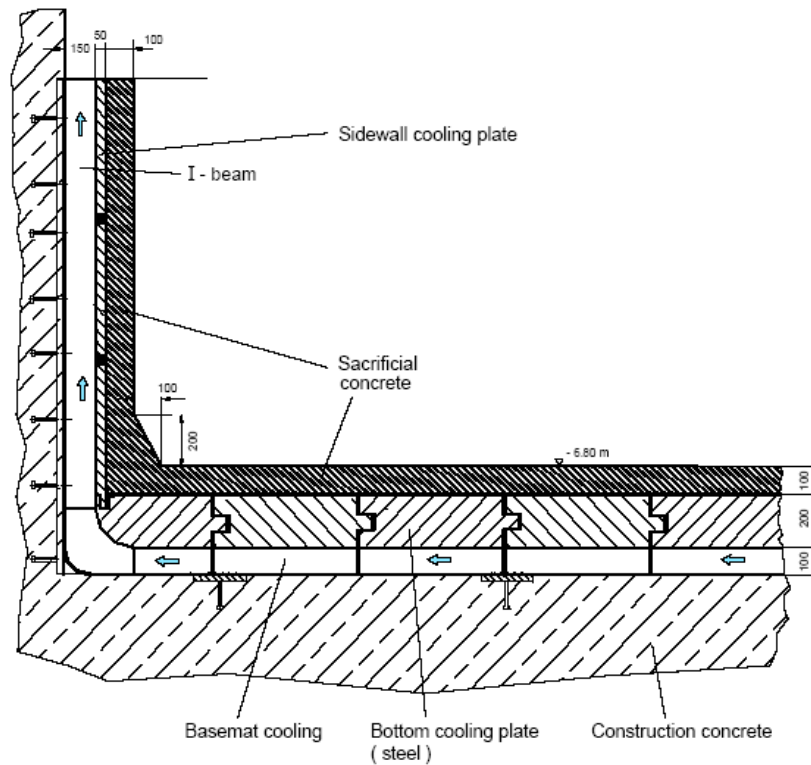
**Figure 1: General view of the EPR reactor pit and spreading chamber [5]**

The reactor pit is covered by a sacrificial concrete – made of Portland cement, iron ore and silica aggregates - that will oxidize the metallic uranium and zirconium and lower the corium liquidus temperature [7]. It will be eroded until the metallic gate melts. Mixing the corium with concrete decomposition products will lead to a composition that is favourable to spreading [8] and reduces the spectrum of possible spreading initial conditions [7].

When the gate melts, large flow rates (around 10 t/s) are expected [8] which improves the spreadability.



**Figure 2: core catcher top view [6]**

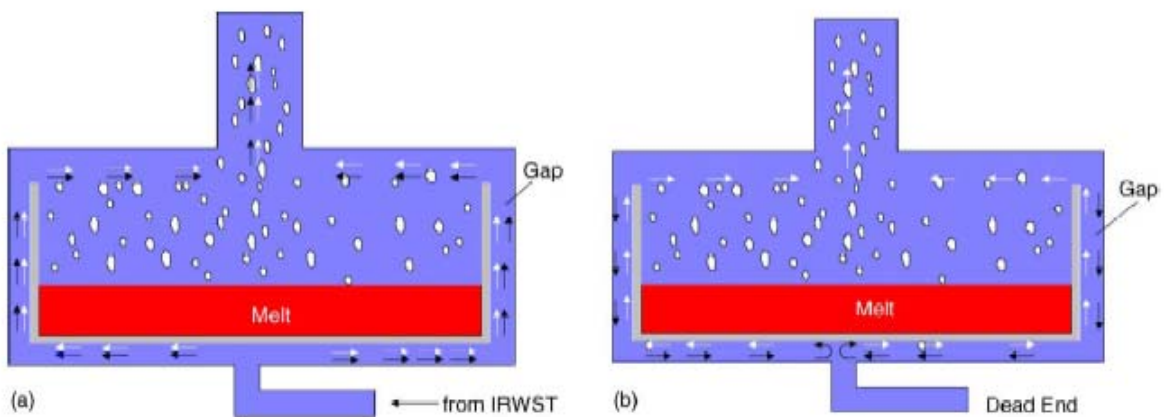


**Figure 3: Structure of the core catcher [6]**

The core catcher is covered by a shallow layer of sacrificial concrete that will limit the thermal loads when the corium arrives. The small concrete thickness will limit the formation of non-condensable gases ( $H_2$ ,  $CO/CO_2$ ), that are released during concrete decomposition..

The arrival of the melt on the core catcher triggers the opening of spring-loaded valves that initiate a passive water-cooling system [9] that will provide cooling from below and from above the corium. For this purpose, the bottom of the metallic structure that makes the core catcher provides a system of regular rectangular channels. They are passively flooded with water from the Internal Refuelling Water Storage Tank (IRWST). The water keeps the channels submerged. Then it floods the corium top surface.

The generated steam will enter the containment where it will later be re-condensed by the Containment Heat Removal (CHRS) system.



**Figure 4: Core catcher flow schemes (a) co-current flow (b) counter current flow [6]**

のフラマンビルで新設用に選定されたと説明されています。

特に、ここではコアキャッチャーの説明が行われています。

EPRのコアキャッチャーはその詳しい構造が広く知られるようになると、世界のメルトダウン事故の発生より前に基本設計が行われ、建設をされてきたメルトダウン対策の欠如した欠陥商用原発の運転継続に批判が高まると考えられたようで、長い間秘密にされてきたようです。

ただ、ここでは非常に珍しく、かなり正確な報告が行われていたようです。メルトダウン事故が発生し、超高温度のコリウムが原子炉圧力容器から下部に落下すると、大型の原子炉ピット内に落下します。

原子炉ピットは、ケーシングの内面に耐火コンクリートを張り付けて、高熱からの保護を行っていますが、その内面に大量の犠牲コンクリートが取り付けられています。

犠牲コンクリートは、ポルトランドセメント、鉄鉱石、シリカ骨材で作られており、金属ウランとジルコニウムを酸化させ、コリウム液相線温度を低下させると説明されています。

原子炉ピットの下部には、金属ゲートが設置されており、原子炉ピットにコリウムと犠牲コンクリートの混合物が大量に溜ると、金属ゲートが溶けて、大量の混合物は樋内を流れて拡散室のコアキャッチャーに流れ込みます。

ここでは、拡散室のコアキャッチャーがかなり正確に説明されているようです。

拡散室の面積は 170 平方メートルあり、下部は水冷溝の付いた厚い耐熱鋳鋼で製作されており、その上部に 100 mm 厚みの犠牲コンクリートが張り付けられています。

拡散室まで流れ込んだ大量の混合物は、最初は 100 mm 厚みの犠牲コンクリートを溶かしながら、水冷構造の厚い耐熱鋳鋼で下部から冷却され、そのあと冷却水が混合物の上部にも流され、上部からも冷却されます。

EPRはこのように設計されたコアキャッチャーを標準取付することにより、メルトダウン事故が発生しても、MCCI（コアコンクリート反応）によって、汚染水の大量発生が起こらない対策を採用しています。

3. の項目でVVER-1000の説明が行われています。

旧ソ連では、軽水炉加圧水型商用原発は、初めは小型の44万kwのVVER-440の原発を建設していたようですが、やがて100万kwのVVER-1000の建設を始めたようです。

しかし、これらの原発にはコアキャッチャーの取付は無かったようです。しかし、チェルノブイリの巨大なメルトダウン事故を経験し、VVER-1000-91/99からコアキャッチャーの取付を始めたようです。



VVER-1000-91/99のコアキャッチャーは、EPRが採用した巨大な拡散室の取付を取りやめにして、原子炉ピットをもっと大型化し、その原子炉ピットの鋼板ケーシングを水冷却で強固に保護する方法です。

旧ソ連から分かれたその後のロシアでは、ロシア型コアキャッチャーに関しては、積極的な宣伝を行っており、『ロシアのカベンスキーの「VVER-1000 のシビアアクシデントマネジメント概念と、るつぼ型コアコアキャッチャーにおけるコリウム保持理論」』に非常に詳しい説明が行われており、その内容がよく分かります。

また、既にこの時期に2台のVVER 1000-99/90ユニットが天湾（中国）で建設され運転が行われており、インドのクダンクラムでの建設が計画されています。コアキャッチャー付原発はロシアの方が先行しているようです。

4. の項目で「COMET コアキャッチャーのコンセプト」の説明が行われていません。

ドイツの原発研究所で、COMET 実験が熱心に行われており、原発に簡単にCOMET コアキャッチャーの取付計画案が提案されています。

ただ、COMET コアキャッチャーを標準装備した原発の計画はまだ無いようです。

これらの結果は、アメリカのゼネラルエレクトリック社の沸騰水型原発やウエスチングハウス社の加圧水型原発が世界の商用原発市場から姿を消していくことの第一原因になったように思われます。

## 9. 容器内容融物保持 (IVMR) 事故管理 (SAM) 戦略

第15章は361ページから383ページまでに示されており、「In-Vessel Melt Retention (IVMR) as a Severe Accident Management (SAM) Strategy (容器内容融物保持 (IVMR) 事故管理 (SAM) 戦略)」となっております。

この報告は、スウェーデンの原子力研究所のB. Raj Sehgalによっておこなわれているようです。

軽水炉原発にメルトダウン事故が発生時、スリーマイル島原発のメルトダウン事故を参考にして、溶融コリウムを原子炉圧力容器内に閉じ込めて、溶融コリウムによるMCCI (コアコンクリート反応) を防止するという、容器内容融物保持 (IVMR) 対策は、一番初めはフィンランドのロヴィーサ工場の小形原発VVER-440で提案されたようです。

次に、IVMR 戦略は、ウエスチングハウス社によって、小型原発AP600に対して検討され、この方法は米国原子力規制委員会 (USNRC) によって認定されたそうです。

そして、その後IVMR戦略は、ウエスチングハウス社によって新型原発AP10

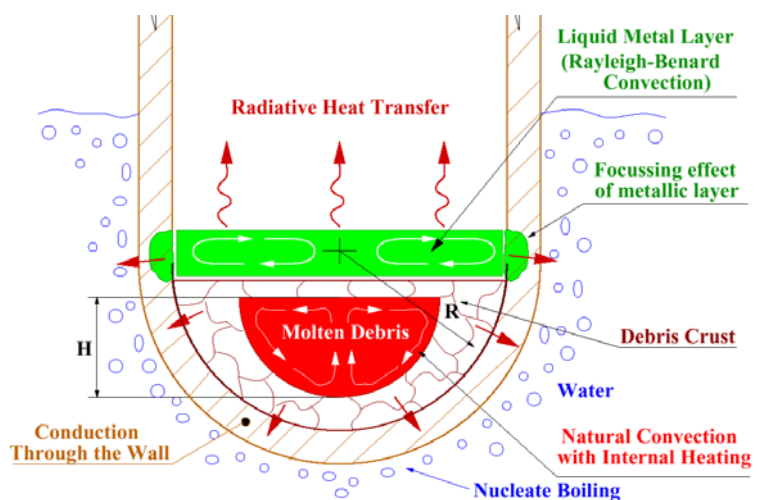


Figure 5: Phenomena of In-Vessel Melt Retention

The oxidic pool will be surrounded by crust all around, but inside it will perform natural circulation motion. The characteristics of such motions were studied by Steinberner and Reineke in Germany (Steinberner and Reineke, 1978) and Kulacki et al. in USA (Kulacki et al., 1972). It was known that the character of the convection is as follows:

- a stationary stratified region near the bottom, where heat transfer is conduction-dominated
- a highly turbulent region above the stationary region in which plumes of fluid rise to bring heat to the top. The plumes cool down and return to the lower part of the turbulent region
- a convective flow along the spherical boundaries of the pool from top to the bottom, replenishing the fluid in the stationary and the highly turbulent regions of the pool.

The most remarkable fact about melt pool convection is that the total upward and downward heat transfer correlates almost to a single non-dimensionless number: the internal Rayleigh number, which is related to the Grashof number and the Prandtl number. It incorporates physical dimension to the power 5. Thus, for prototypic vessel size the values are  $10^{16}$  to  $10^{17}$ . The upward and downward Nusselt numbers had been measured for  $Ra$  numbers upto  $\sim 10^{12}$  but correlation was needed for higher values.

For the work on the Loviisa reactor, an experimental facility named COPO was built, which employed a slice facility of  $\frac{1}{2}$  scale employing salted water heated electrically. Besides measuring the upward and downward heat fluxes, measurements were also made for the variation of heat transfer as a function of the polar angle:  $Nu(\Theta)$ . Clearly, as the heat rises, greater heat is transferred to the vessel wall at higher polar angles. The maximum temperature is close to the top corners of the oxidic pool.

The COPO facility (Kymäläinen et al., 1994) employed a torospherical lower head as found in all VVERs. Prof. Theofanous built a facility named ACOPO (Theofanous et al., 1997), which was a full scale hemisphere. Instead of heating salted water, he employed hot water, which

00の基本設計に組み込まれ、米国原子力規制委員会（USNRC）によって認証されたと説明されています。

また、韓国の新型原発APR-1400の基本設計にもIVMR戦略は組み込まれたと説明されています。

ただ、韓国の新型原発APR-1400の基本設計では、AP1000のIVMRよりも一部強化が行われたと説明されています。

この報告では、以上の経過が説明されておりますが、そのあとで(IVMR)を開発するために行われた、大量のモデル実験とコンピューターコードの開発が詳しく説明されています。

研究が進んでくると、核燃料の酸化ウランなどの比重よりも、ステンレス鋼などの構造用金属の方が比重が軽く、メルトダウン事故が発生し、溶融コリウムが原子炉压力容器下部に大量に貯留したとき、それらの金属層が貯留プールの表面に薄く滞留し、原子炉压力容器を溶かしてしまう危険性が有ることが分かりました。

そのため、メルトダウンが発生時には、格納容器内に緊急に大量貯水を行ない、原子炉压力容器を水冷する事により、原子炉压力容器溶融防止策としました。

この方法で、小型原発では原子炉压力容器溶融防止策が出来そうなことが分かりました。

ただ、原発の出力が大きい大型原発になるほど、原子炉压力容器の冷却が難しくなることが分かってきました。

そのため、原子炉压力容器管体の有効な冷却方法を知るための大量の実験が行われたようです。

それらの実験の中で、AP1000の出力でも、水冷に特殊な操作を与える事により原子炉容器の管体が溶融しない実験に成功したとのことで、AP1000の出力での(IVMR)がアメリカでは認可されるようになったようです。

ただ、AP1000のIVMR戦略は、世界の各地では必ずしも受け入れられていない場合も多く、AP1000の新設にはかなりブレーキがかかっているようです。

## 10. まとめ

7. の項目において『天然資源に乏しいフランスは、1973年の第一次石油危機を契機に原子力開発を加速した。』と説明されていますが、日本も同じように国内の化石燃料の資源に乏しく、国家的なエネルギーの欠乏対策として、原子力開発を加速したと思われまます。

しかし、原子力発電所を大量に運転するにあたっての、メルトダウン事故対

策には大変大きな差があったと思われます。

日本でも、1999年9月30日に東海村のJCOの核燃料加工施設で臨界事故がありました。

また、2007年7月16日の新潟県中越沖地震で、柏崎刈羽原子力発電所が大きな損傷を受けていました。

そのため、日本国内でも、原発のメルトダウン対策には、いづらか取り組みが始まっていたと思われます。

しかし、依然として、日本国内では、原発の安全神話が常態化されており、原発のメルトダウン対策を詳しく論ずることはタブーされていたように思われます。

ところが、海外では「SARNET Lecture Notes on Nuclear Reactor Severe Accident phenomenology」のような詳細な報告書が公開されていたようですが、最近までその存在を知らませんでした。

しかし、このようなOECDの加盟国ではメルトダウン対策に一番遅れていた日本の実情が、2011年3月の福島第一原発のメルトダウン対策を引き起こした最大の原因と思われます。

2011年3月の福島第一原発のメルトダウンの発生後、政府事故調査報告書や国会事故調査報告書をはじめとして、いくつかの事故調査報告書が発行されています。

政府事故調査報告書は、事故発生の経過は詳しく調査し、報告が行われていますが、事故のメカニズムの解明などは行われていません。

また、国会事故調査報告書は、事故調査報告書の中では、事故のメカニズムの解明などは一番踏み込んでいるようですが、国会事故調査も短期間で開催されています。

2011年3月の福島第一原発のメルトダウンの発生後、13年間経ってしまいましたが、これらの原発の内部調査などは細々と継続されているようです。

そして、そのようなあいまいな状態を継続しながら、新規制基準が策定され、新規制基準に係わる適合性審査が行われ、加圧水型原発のみが多数再稼働されています。

2012年には、追加報告の「Nuclear Safety in light Water Reactors(Severe Accident Phenomenology)、「軽水炉における原子力安全性(シビアアクシデント現象論) Edited by Bal Raj Sehgal」が発刊されています。この書籍は福島第一原発の事故についても報告されていますが、検討内容は「2011年6月10日までに収集された情報に基づいています。」とあり、これまでの「シビアアクシデント現象論」が、福島第一原発のメルトダウンの事故により、正しかったことと、不十分であった事との解明はこの時点ではまだ

行われていません。

そして、メルトダウン事故が一番激しいと推定されていた福島第一原発1号機の格納容器内の観測が2023年になってやっと始まったばかりです。

これから世界の「シビアアクシデント現象論」を日本で詳しく見つめなおし今後の教訓として行くことが、福島第一原発の甚大な犠牲の結果を、今後世界に向けて少しでも生かしてゆく大きな力となるように思われます。