

第1回福島第一廃炉国際フォーラム

セッションIV

燃料デブリ取り出し

- CA ネギン&アソシエイツ(米国)プロフェッショナル・エンジニア C.A.ネギン
- ロシア科学アカデミー原子力安全研究所副所長 V. F. ストリゾフ
- パクシュ原子力発電所(ハンガリー)核燃料部長 L. ゴーケ
- 国際廃炉研究開発機構研究管理部長 高守 謙郎
- 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 執行役員 技術グループ長 福田 俊彦
- 東京大学教授 越塚 誠一

(注) 当日通訳された内容をそのまま記録していますが、実際に話をされた言語による記録に基づいて若干の補正をしております。

C.A.ネギン：

ありがとうございました。他のパネリストの皆さま方をご紹介いたしたいと思います。まずストリゾフ先生、そしてパクシュ発電所のゾーケ燃料部長、IRIDの高守様、そしてNDFの福田様です。よろしくお願いいたします。

では、いくつかまず申し上げたいと思います。これまでのセッションとは違っていて、純粋に技術的なセッションとなります。ですから分かりやすい言葉というのは、ほとんどないかもしれません。そこは申し訳ございません。あらかじめお詫び申し上げます。3つの歴史的な事例、パクシュとスリーマイル島とそれからチェルノブイリという事例が過去にありました。その話とそれから、今度は今後の話ということで、福島今後の課題について話をさせていただきます。越塚先生、よろしくお願いいたします。

越塚：

東京大学の越塚です。よろしくお願いいたします。最初のご講演はネギンさんからTMIのお話をいただきます。TMIはご存知のように炉心溶融を起こしまして、その後燃料の取り出しが、もうすでに完了しております。今日はそのお話をさせていただけるというふうに聞いております。それでは、よろしくお願いいたします。

C.A.ネギン：

はい、ありがとうございました。それでは、この発表ですけれども通常やるものの短いバージョンとなっております。今日は15枚のプレゼンということですので、概要をお話したいと思います。

まずTMIの概要ですけれども、黄色い部分、こちらがかつて溶融した燃料の部分です。この絵があるということは、事故後に、かなり特性評価をおこなったから、初めてこの絵が描けたということです。これだけの物質がTMIの容器に残っていました。900キロくらいになります。プラス100キロが、系統の他の所に分散したという状況で、後で御説明を致します。

それから、TMIでは冷却ができなかった時間は1日のうちの数時間だけということで、これは福島とはかなり違う状況です。TMI2号機は格納容器も溶融したわけではありませんし、また、汚染が建屋の外に出たわけではありません。TMIの島そのものにも拡散はしなかったという状況でした。

それからもうひとつこの絵を見ていただきますと、まず燃料を取り出す部分というのは、炉心があった中央部

分だけではありませんで、この容器の下部、それから横の部分ですね、いわゆるコアフォーマープレートと呼ばれている所からも取り出す必要がありました。

ということで、事例をお見せしたいと思いますけれども、4枚とも燃料デブリの写真です。

左の写真は、これが燃料棒。そして右側、デブリが落ちているところが分かると思います。

左下の写真の左側、見えづらいですがこれは fuel spring、燃料集合体の中から出てきたものです。それから右の写真、燃料棒がありますけれどもこれは破損しています。

ですが、一部残っていて、右側がその瓦礫です。この瓦礫は燃料を取り出すための作業の結果、出てきた瓦礫です。

それから、次頁、これも燃料取り出しの領域なのですけれども、右の図を見ていただきますと、下部の支持グリッドの下が炉心の空洞になっています。流量分配器があってこれが炉内を下から上への流れを分配する部分です。ローワーサポートグリッドというのがありまして、その炉内全体に分散している部分があります。この写真ですけれども、赤い線に沿って上側の上部グリッドを見たものです。

溶融している所が在って、数日間ではなくて、数時間で起こったことです。ですから、福島の場合にはここもデブリを取り出さなくては行けないかと思っていたところ、幸運にも通常通りクレーンを使って取出すことができました。

次頁のグラフ、これは事故の進捗と、その後の燃料取出しの進捗です。そして、スケジュールです。

上のところ、事故は79年に起きました。一番上にはまず情報、つまり燃料デブリがどこに存在しているのか、ビデオを撮り、ソナーを用いて分布の情報を収集しました。

84年の段階でいくつかの決定をしました。これについては、あとで説明致します。

ひとつは燃料取り出しチャンネル、ここの水を抜き気中で作業するというやり方をとる。それから、手動でほとんどやろうということでした。

84年に頭部が容器から取り除かれました。ここの部分は計画通りに進みました。これは、そのあまり大きな問題とはなりませんでした。

こちらの時間軸で見えていただきますと、84年、85年から、その取り出しが始まりました。ご覧いただけますように、これがその手動での燃料取り出しということでありましたけれども、この曲線の勾配です、見ていただきますと、少し急になって、その後、少し横ばいになった。つまりペースが落ちたのです。

3ヶ所で横ばいになっています。

86年の2月、87年の12月と89年の5月にそのペースがゆっくりになった理由を後で説明します。

86年の2月に、まったく想定していなかった、本当にまったく予想していなかった、水中で生物が繁殖していたということが分かったのです。これは藻のようなものでした。それが水中の視界を遮り、フィルタをつまらせました。それが何なのかということをまず見極めること、それにどう対応するのかを決定しました。

安全策として過酸化水素で死滅させましたが、そのため丸一年進捗できませんでした。
それから今度は 87 年になりまして、容器の所、ドアグリッドの所をお見せしましたが、それ炉心をサポートしている所で、これくらいの厚みです。ですから、ここの部分をまず取り除かなくてはならない。
そうしないと、その下に到達できないということで、その切断に時間がかかったということでした。
最後、89 年の 5 月、ここが横ばいになりましたのは、最終的に小さな粒子だけしか、もう残っていなかったということで、その部分は、ひとつひとつ取り除くというのに時間がかかったということで、何か物理的な障害があったというわけでは、その時はありませんでした。

まず燃料の状態が分かる前に 5 つの概念をまず考案いたしました。細かいことは申し上げません。
というのは結局、どれも利用しなかったからです。だいたい状態が分かってきた時点で遠隔でやろうと。

遠隔操作の細断システム、真空移送システムを使おうということになりました。
炉内でまず細断して、そして移送しようということも考えたのですが、それもやりませんでした。
というのは、それを開発、実証しても、最終的に信頼性が非常に低いということになりまして、しかも、これに数年かかるということが分かったのです。主に手動で取り出そうということになったのですけれども、長いハンドルを持った電動ツールなどを使って、取り出すということになったのですけれども、その炉の下まで、20 メートルくらいの距離がありました。だいたい福島の場合の 3 分の 1 くらいの距離です。
そういった理由で、非自動でやろうということになりました。

まず炉心にボーリングマシンが使われることになりました。右下の所に実際にマシンのモーターがありま
すけれども、これは掘削用に実際に使用しているものを改造したマシンでした。
これが実はこのプロジェクトでは最も重要な機械のひとつとなりました。これがこんなに重要になると思っ
てもいなかったのですけれども、エネルギー省が設計して、そして供給したのですが、まず炉心から将来のシ
ミュレーションとか科学の促進のためにサンプルを取ろうということで、穴をあけてサンプルを取出し、中空にし
ました。そして、サンプルはアイダホの研究所に移送し、分析を行いました。

その後、この写真にもあるかもしれませんが、手動で取り出しをするということで、真ん中の溶融した部分と
いうのは、取り出せないのです、ここはもう完全に固まっている所で、100 ヶ所くらいに穴をあけて行ったのです。
大きな塊だったものをスイスチーズ化したと言っていました。そして、下の所のグリッド、これはステンレス鋼
のプレートなのですけれども、そこに穴をあけて、そしてプレートを切断して、そして取り出そうということになり
ました。

実際に使った工具ですけれども、手動で使ったツールもあります。プラズマアークもかなり使いました。
デブリの切断ではなくて、原子炉の横にある金属などを、アクセスするということのために使いました。
さらに、水バキューム、エアリフトを使いました。エアリフトは水中で使用する機械でありまして、
これは海洋でも使うものなのですから、例えば瓦礫を取り出したり、そういった時に使いますが、それも

使いました。それから、グリッパとかバケツとか、そういったものも使いました。また、長いハンドルの付いたツールを使いましたけれども、股のところに装置が付いているのが分かると思います。

重要なのはサイト内に新しい工場があったことです。こうした材料を取り除きたいとしている人たちが、こういう形状だから、こういう工具が必要で、工房にこれを作ってくれということで発注すると、1日後、2日後に新しいツールができ上がってくるということで、また、作業が進行できるという状況でした。

こちらの写真ですけれども、これはプラットフォームと呼んでおります。

燃料交換用のチャンネルの水を抜き気中にすると言いましたけれども、プラットフォームの両側に壁があり、この壁の中に燃料交換チャンネルと呼んでおりますけれども、通常は水を張って冠水しており、最初は作業員を被曝から遮蔽するということで水を張っていましたが、Cs 汚染水からの作業員への被ばくがありますために、水抜きをして気中としました。

もうひとつの写真はプラットフォームそのものです。次頁の通り3種類のキャニスタを使いました。燃料デブリを入れるのに、一番左、まず長いハンドルのツールでそのキャニスタに入れて、それから今度、重力で下に沈殿させるという形で使ったキャニスタ、そして右側がフィルタキャニスタ、これは微細粒子などのデブリに使いました。このフィルタキャニスタはもしかしたら、間違いだったかもしれません。

福島、IRID のチームに提案しているのは、例えばフィルタは中ではなくて、キャニスタの外に出すべきである。そして、だんだん減水した後に、その中に入れる。というのはフィルタが詰まってしまうのです。

ですので、フィルタは中に入れるのではなく、キャニスタの外に置くべきだという提案をしています。

キャニスタの中に入れて後に、今度は使用済燃料プールの中に貯蔵されました。これはカスクで移送して、動かしている様子が出ておりますけれども、輸送しました。

最終的にはこのカスクは、アイダホ研究所に輸送しました。右が輸送用のカスクですけれども、中に装荷しているところ、そして、実際に積み下ろしをしているところの写真も出しております。

左側、こちらですけれども、実際に列車でカスクを乗せて、そして輸送しましたけれども、両端にエンドフィッティングありまして、そして保護しました。アイダホに使用済燃料があり燃料をプールに設置しておりました。カスクは到着してこのプールに入れましたが、DOE のプロジェクトとして、アイダホ研究所はクリーンアップすることになり、プールは取り壊されることとなりました。

今度は乾式貯蔵で保管するということになり、そのキャニスタはまず中に入っている水を抜いて真空乾燥しました。現在も1,000キロくらいの燃料がありますけれども、そのうち、900キロ位がすべて粒子状のものとなっていてアイダホ研究所のキャニスタの中にあります。残り100キロ位は原子炉の系統内に分散しています。これはコンポーネントごとを切断しないと取り出せないということで、まだTMIに残っております。もう臨界にはならないと判断され、すでに水が全部抜かれています。

また、1号機は今も発電しているのですけれども、それは許認可が切れる時に廃止措置となるということで、そこで、(2号機も)解体されることになっております。

福島で開発されるテクノロジーが、今後20年後にわれわれの役に立つだろうと考えております。

意思決定でどのような節目があったかということなのですが、最初にどうやって取り出しをできるのかということは、燃料がどこにあって、そして、どんな特性か、どんな形状かという評価ができるまで、決定できないということが分かりました。サンプルを取らないと分からなかったということです。

そして、最終的には手動で取り出そうということになったわけなのですが、自動でやると、開発と評価に時間がかかるということでした。また、燃料交換用のチャンネルを冠水しないで気中でやったがこれは作業員の保護に十分配慮してやったということ。

それからボーリングマシーンを使ったのですが、溶融した燃料とデブリのサンプルが大事だったということ。それから、生物が繁殖して1年工程が遅れたということを書きました。

こういった可能性があるということを、ぜひ皆さんも知っていただきたいと思います。

プロジェクト全体の重要なポイントとしては、これはDOEのプロジェクトだったので、DOEはサイトの中にオフィスがありまして、毎日のようにやり取りをしていました。

そして、やはり電力会社だけでは権限及びリソースがなくて、できなかったこともありましたが、DOEがサイト内にいたということで、いくつかの活動の中にはDOEが主導してやるということもありました。

意思決定、例えばTMIから燃料を外に運び出すということ、そこで貯蔵できないので他に出すということも決めてもらいましたし、また、長期貯蔵のために輸送することも決めていただくことができましたので、良かったです。

以上です。ありがとうございました。

越塚：

どうもありがとうございました。

それでは、次は、ロシア科学アカデミー原子力安全研究所副所長のストリゾフ教授よりTMIのコリウムについて、ご発表いただきます。コリウムというのは専門用語で、デブリと基本的には同じものです。それでは、よろしく願いいたします。

V.F.ストリゾフ：

座長、ありがとうございます。最初にNDF、そして経済産業省に対して、招聘していただいて感謝を申し上げたいと思います。このフォーラムに参加講演をおこなわせていただきますことは光栄です。

私のプレゼンテーションにおきましては、いくつかの疑問をお話させていただきます。

私の分野は過酷事故のモデルシミュレーションですが、私の活動の側面から、福島第一の燃料デブリ取出しに貢献できる事柄を中心にお話をさせていただきます。

又過酷事故の異なったフェーズ(容器内そして容器外)のそれぞれで溶けて液化した素材の物質構成の

話をしたいと思います。 実験/試験の結果やチェルノブイリの事故結果で福島との類似している点をお話させて戴きたいと思います。

BSAF のサマリーレポートやウェブサイト等の情報によれば炉心の安定化後の状態の可能性としては 2 つあります。(福島第一)2 号機はおそらくリアクター内で安定しているということであり、従い、TMI2 号機と、同様の炉の状態であるわけです。そして、また(福島第一)1 号機と 3 号機に関して、炉心のコリウム、燃料デブリの安定化がリアクター外であるということで、チェルノブイリの 4 号機の事故と非常に似ているということがいえます。

また私どもが以前から研究している重大な内容として、炉内に留まった場合のデブリの組成は、ウラニウム、ジルコニア、ジルコニウムメタル、それは酸化していますし、ステンレスの構造物と融合していたりします。そして、また、溶融物の組成は、酸化の度合いやまたステンレススチールと酸化した原料の組成の割合によって異なります。

これらの調査は OECD RASPLAV-MASCA プロジェクトにおいて研究されました。そして、異なるフェーズにおける FP(核分裂生成物)の分類もなされております。そして炉外の場合は、コリウムに更に追加的な組成があり、それはコンクリートです。そうしてまた、溶融物の層は、通常金属相が酸化物相の下に位置します。これは酸化物相が金属相より比重が軽いことによります。

また、MCCI(炉心溶融物-コンクリート相互作用)については、広範的な試験/実験データベースが既にあります。また FP(核分裂生成物)の放出に関しても試験/実験を通して研究が蓄積されています。それから溶融物質の流れ出し拡散に関しては、この現象はチェルノブイリ事故の大きな特徴でもあり、また仏でも実験的に研究されています。そして、この容器内での動き方の違いは、この炉内の溶融物の(成分)構成によって違うということです。

この視点より異なる溶融物の構成成分によるいくつかの実験結果を示したいと思います。

ご覧のように金属相が酸化物相の上にあるか下にあるかは酸化の度合と酸化物への混じった鉄の量によっても変わってきます。

福島第一のアセスメント、評価といたしましては、われわれの BSAF の友人によれば、酸化度が 50%ということになります。また、BWR のリアクターの特徴として、ジルコニウムの含有量が少し高くなりますのでウラニウムとジルコニウムの比率は 0.8 になっています。そして、溶融物内の鉄の質量比は 0.3 です。したがって、恐らく福島第一の 1 号機では溶融物の構成成分から言って、酸化物の上に金属相が観察される最も一般的な状態であろうと予想されます。

それでは、今度はチェルノブイリのお話をしましょう。

ご存知のように、このチェルノブイリの事故は福島の前年の 1986 年 4 月 26 日に起こりました。

この 4 月 26 日は保守のために原子炉停止が予定されていたわけです。

そして、その前にいくつかの出来事がありましてこれらといくつかの操作ミスがリアクターの不安定な操作操作を決定づけました。タービン停止により電源供給システムの試験が予定されていましたが、安全システムが不安定になり、また運転側のミスもあり、そして、この事故発生に直結する緊急時保護制御棒も関係してきます。ですから、福島とは発生理由が違いますが、そういった中で、サイトとして、このスライドの写真にあります炉が事故後の状態を示しています。

事故により炉が破壊され、そして炉心からの生成物がチェルノブイリ周辺環境に対して放出されています。

最初の 5 年間は汚染区域に関して、たくさんの調査がおこなわれました。

燃料の 95%以上がシェルター範囲内に存在していたわけですが、1996 年 12 月にシェルターが建設されたのは御承知の通りです。そして、LFCM(溶岩様燃料含有塊)に関する調査がおこなわれております。そして、ISTC プログラムとして、データ分析により何とかモデルが作成され、それによって溶融物質の動き方の特性を理解できる様になりました。そして、データ収集の主要な方法は、溶融した炉心にボーリングで穴を掘り、目視、あるいはゾンデを使い、あるいは測定器具を使って、ボアホール内の温度および放射燃料のデータを取っています。

そして、こういったボアホールのデータ収集と分析を使って、ウラン含有物質の 2 つの一連の流路、いわゆる水平流と垂直流とに 2 つに分けることができることが解りました。垂直流は、これは炉がそのように設計されている為発生しますが、炉の下に 2 フロアありスチームディストリビューションコリドールとウォーターバルブプールがあります。

そしてまた、蒸気解放バルブから垂直に落ちた後、水平方向に溶融物が部屋 305/2 および 304/3 の間の壁の破損部から経由して拡散もあったわけです。これが実はその時の目視観察をした時の写真なのですけれども、このように粘性の高い流れであったわけです。

このガラス状の非常に高い粘度が特徴になっています。そして、この溶融物の発生源ですけれども、リアクター下部、305 室で、この部屋において最初のコンクリートとの反応が起きています。

それが故に、ここに最終的には溶融物質のプールが形成されていて、その後、垂直方向、水平方向、両方に拡散していきます。

こちらが一般的な事故後の異なるデブリを、図式的に表したものです。

この事故進展解析をする為に、われわれは演算モデルを作って、パンケーキ・モデルと名付けました。

この演算モデルにおきまして、実際のデブリの構成でモデルをシミュレートしています。いろいろなもの、上からの放射性物質、その他いろいろなデータを入れています。そして、いろいろそういった物質を含めて相互作用の計算するモデルとしています。

そして、事故に沿って溶融物の相互作用も評価して、7 日間から 10 日間くらい、これらの黒鉛燃焼と溶

融時間があつたと評価をおこなっています。というのは最初に黒鉛グラファイトの燃焼もあるからです。

拡散のほうですけれども、拡散は 305 室と 304 室間の間での壁が破損したということが原因になっていますが、先ほど申し上げましたように、温度がだいたい 1,400℃と比較的低温で広がっています。10 時間持続しました。距離は 13 メートル以上の長さになっています。

最後のまとめです。このプレゼンテーションで申し上げたのは、このようなことです。

OECD RASPLAV-MASCA プロジェクトの結果としては、原子炉圧力容器内の想定される溶融物の構成を示しています。チェルノブイリの溶岩様の塊が存在する場所にありましては、溶融物質におきまして、非常にコリウムの流動性が高いということ。そして、ウラン含有率と崩壊熱が低い場合においても、非常に長い距離、長距離拡散するということです。

そして、チェルノブイリと福島ではデブリの形状、構成や場所が大きく異なるということが分かるわけです。これは、アクセス性、接近可能性の観点では福島のほうが問題が多い。溶融物質がいろんな異なる場所に拡散する。炉の内部から拡散しているわけですが、福島においては、昨日話がありましたように、サンプルを採取し、その溶融物質に関して、さらに溶融物質の構成を知る必要があります。

いくつかの参考資料もここに示しております。チェルノブイリ事故のより詳細に関しましては、こちらの最近発刊された刊行物で分かりますし、データとしても、あるいはいろいろな研究、調査におきまして、昨年、こういった本のサマリーが出ております。

どうもありがとうございました。

越塚：

どうもありがとうございました。

それでは、次はパクシュ原子力発電所核燃料部長のミセス ソーケよりパクシュ原子力発電所の話をしていただきます。これは、ハンガリーにある原子力発電所で、燃料破損の事故を過去に起こしております。燃料の取り出し、デブリの取り出しは、もうすでに完了しております、そのお話を今日していただけるというふうに聞いております。それでは、よろしく願いいたします。

L.ソーケ：

ありがとうございます。

皆さま、こんにちは。お招きをいただきまして、ありがとうございます。

私どもの経験を共有できますことを大変嬉しく思います。パクシュ発電所における破損核燃料の管理に関するわれわれの経験の話になります。

ハンガリーは中央ヨーロッパの小国です。原子力発電所は国の所有するものが、一か所、このサイトには 4 基のロシア設計の VVER440 型の炉があります。

今は 500 メガワット、50 万キロワットの出力で運転されております。このパクシュ発電所は国内発電量

の50%以上を担いますので、非常に重要な役割を果たしております。この先、さらに20年間はその状態が続くとしています。2000年代の初期にパクシュ発電所のいくつかの号機におきまして、マグネタイト(磁鉄)の堆積物が燃料集合体に発生しました。調査をしたところ、これは蒸気発生機の改造前の本格的な除染による結果だということが分かりました。

2003年の2号機の定期検査中にこの燃料集合体に化学洗浄を実施しました。

これには、特別に設計をした洗浄タンクを用いまして、原子炉ホールのピットの場所に設置されました。4月10日に冷却機能が不十分だったことがありまして、30ほどの燃料集合体が大きく破損しました。プラント本体の技術部分には影響はなかったのですが、この破損燃料をカプセル容器に収納しまして、ピットをクリーンにする必要が生じました。

浄化タンクが使用済燃料を原子炉から取出すための邪魔をしていたので、損傷燃料と浄化タンクを取り除きピットをクリーンアップする必要がありました。

最終的に回復するまでに11年間かかりました。修復にかかった時間を3段階に分けて考えることができます。

第1段階の、第1弾は、事故の原因の調査、そして燃料およびピットの状態の理解に費やしました。

その結果、事故の原因は何かというと、設計のミス。残留熱除去についてあらゆる状態でそれを適切にできる設計になっていなかったということでした。

燃料は溶融しなかったものの、大きく破損しました。6トン以上の燃料がこのタンクの中に含まれていましたけれども、中央の部分につきましては破損してこぼれ塊となり、端の部分についてはほとんど無傷でした。

第1段階の第2弾として、とにかく燃料を安定化し、この破損燃料の安全状態を確保する必要がありました。そのための作業は、ほとんど発電所の専門家、それから国内の研究機関および設計組織が担いました。

初日から発電所は非常に開かれた、そして、体系的なコミュニケーションを公衆に対しておこないました。もちろん当初は全ての新聞が悪く書きたてたわけです。そして、ジャーナリストに対しては、発電所が情報を提供しても信じてもらえませんでした。この体系的な情報がなされて、情報提供がなされたわけですが、この原子炉ホールからのプレスリリースをしたことによって、一般公衆の理解は深まり、信頼の醸成ができたのではないかと考えています。

この第1段階が完了しまして、第2段階が開始されました。この段階で目指したのは何かというと、燃料取り出しのための準備、そのための許認可、そして、洗浄タンクからの燃料の取り出しです。

2003年に発電所ならびハンガリーは、いずれも適切な技術を所有してはいませんでした。

また、こういった事故からの復旧についての経験も十分にはありませんでした。2003年にロシアの会社TVELとパクシュ発電所で契約を結びまして、このロシアの専門家たちがもちろんのことながら原子力安全、それから放射線安全の全ての要件を満たす技術を作りだして、損傷した燃料集合体をこの浄化タンクか

ら取り出すということに向けて、この仕事を進めていき、このプラントの1号ピットを空けることができました。本件はロシアならびにハンガリーの業界のリーディングカンパニーが仕事を担いました。ロシアならびにハンガリーの専門家は密に協力をしまして、非常に短期間の間に準備作業を実施することに成功しました。

それは技術的な解決策を決めて、必要な、非常に複雑な設備などを設計して、製造するという事です。キャニスタは2種類作りました。それから損傷燃料と固体放射性廃棄物のキャスク、これらを設計したわけです。幅広型のキャニスタについては、ほとんど無傷の燃料集合体を納めるためのもの。幅が狭いキャニスタはデブリを収納していくためのものとししました。また、大型の復旧のための設備、作業プラットフォーム、それから、つり上げのプラットフォームならびに工具類が設計されて、製作されました。プラットフォームは損傷燃料のある洗浄タンクの上のピットの1番に設置されました。

広範囲で集中した準備が3年半続きまして、2006年の末に損傷燃料を容器へ納めるという行為が問題なく、予定の3ヶ月で終了しました。これはスタッフがマニュアル機器で燃料を安全に水中でカプセルに納められました。ほとんど無傷の燃料集合体は、ステンレス鋼のヘッドとレッグの部分を切断しまして、幅広のキャニスタに納めました。燃料の小片については、スペースホルダーに納めて、そして、幅の狭いほうのキャニスタに収納しました。この核分裂物質が含まれないヘッドおよびレッグについては、固体廃棄物用キャスクに納めました。これにつきましては、通常の放射性廃棄物と同じような取り扱いとしました。

こちらの写真をご覧くださいますと、この作業現場、燃料の取出しの際に使った様子が分かります。プラットフォームがピット中に納められて、そこで、運転員が操作をおこないました。ピットの隣が使用済燃料プールになって、燃料を収納したキャニスタが、燃料交換機によって運び込まれ仮貯蔵したわけです。それから、プールの後ろにあるのが燃料交換キャビティで原子炉の上にあります。勿論この取出し作業をする際には、原子炉自体は停止をしていることは御了解の通りです。

たいていは3名のロシアの熟練した運転員が作業プラットフォームで、同時に作業しました。視界は非常に良好でした。燃料に関しても、ツールについても、よく見えました。ビデオシステムもありましたし、それから、下の窓や水を通して視界が確保できました。4人目の操作員は、ハンガリーとロシア人の当直長だったわけですが、彼らが原子炉ホールから監督をしました。これは近くの間所だったのですけれども、制御盤とディスプレイを見ながら指示をしたわけです。24時間体制で3直にわたって、この作業は続けました。

ここでの線量はだいたい1時間あたり3から5 μ Svというレベルでした。これを達成できた根拠は何かというと、しっかりした遮蔽ができたということ。水にしても、設備にしても、遮蔽がしっかりできたということ、水の放射能レベルが比較的、低かったこと。それから、管理の手順がしっかりしていたこと、だと言えます。

この第 2 段階が終わった段階で、すべての燃料はカプセル容器に収まっていました。

この水で充てんしたキャニスタを換気しまして、使用済燃料プールに収めました。この段階では、管理した形で燃料の貯蔵ができるようになりました。その状態までもっていったということが、非常に重要だと思います。ということは、詳しい技術的な解決策を長期的な視点から作りだすための時間の余裕がここで生まれたということです。

ここから第 3 段階、完全なる復旧までの話をしたいと思います。

ここで、もちろん目指したのは、事故が起きる前の状態へプラントの状態を戻すことです。そのためには技術を作りだす必要がありました。それは、乾燥と、それから、キャニスタの密閉のための技術です。

そして、移送をおこなって、キャニスタの乾燥を実施して、その乾燥したものを再処理施設まで移送する、ということまでやらなければいけませんでした。

この段階で、第 2 段階と違ったのは何かというと、この 2 号機がフル出力で運転を再開した時にも使えるような技術を用意することでした。ということで、実際の使用済燃料で実験をして、損傷燃料の挙動をこのキャニスタの中で確認する必要がありました。そして、その乾燥技術について実現可能かを確認する必要がありました。ハンガリーにはそのための技術的根拠もなければ実験用のホットセルもありませんでしたので、この実験については、ロシアでやってもらいました。

3 年かけた長期のリサーチが進んでいきまして、この乾燥する、燃料の乾燥をして、ロシアの再処理施設へ移送するというオプションが実現可能と判断されました。

これはハンガリーにとって最適なオプションでした。といいますのは、ハンガリー国内には再処理施設はありません。現行の使用済燃料の中間貯蔵施設というのは、あくまでも通常の使用済燃料を受け入れるような許認可にしかかっておりません。2013 年の後半になりまして、ロシアのソスニーという会社の支援を受けて、68 のキャニスタの乾燥が終了しました。全台、終了したということです。

そして、この時には熱真空乾燥を使ったのですけれども、それはピットの 1 番の中でやりました。

2014 年の夏にはロシアのマヤツクにしっかり輸送できました。これによって、事故が 2003 年に起きた後の復旧作業が完全に終了したわけです。

すでに申しましたけれども、ここまでかかった年月は 11 年以上でした。

ひとつ成功した理由を挙げるとすれば、われわれの場合には、そのスケジュールをさほど密にしなかったということだと思います。ですので、あらゆる準備作業や決定のために、しっかりと時間を掛けることができたということだと思います。

それでは、それ以外の要因にも少しだけ言及したいと思います。全ての作業を安全に深刻な問題なく実

施できた要因です。

まずは発電所の上層部から、しっかりとした支援があったということ。

必要なリソースは担保されていたということ。それから、このソリューションを満たすために先端のハンガリーおよびロシアの設計、研究エンジニアリングの会社に関与したということ。

そして、あらゆる作業において、保守的なアプローチをとったということ。重要な分析、解析につきましては、少なくとも2つの独立した組織に実施をしてもらって、それらの結果を比較して、実施しました。

それから、全ての段階において、モックアップ試験を実施しました。追加の検査をした後にしっかりとトレーニングを受けた人員によって作業を実施しました。もうひとつ強調したいのは、ハンガリー原子力機関、こことの素晴らしい協力も挙げなくてはなりません。

この当局としっかりと相談をして、また当局の管理、監督のもと、すべての作業を進めていくことができましたし、当局からの許認可も作業の全てのステップにおいて、得られました。

すべての段階におきまして、追加的なより厳しい基準を定めて、当局から支援されました。

以上でございます。パクシュの話はここまでです。ご静聴ありがとうございました。

越塚：

どうもありがとうございました。

はい、それでは、次2件は日本からのご発表になります。

最初は国際廃炉研究開発機構 IRID の研究管理部長の高守様からお話いただきます。

デブリ取り出しに関する日本での技術開発の状況についてお話いただきます。

では、よろしく願いいたします。

高守：

ご紹介ありがとうございます。

IRID の高守でございます。本日は IRID におけます燃料デブリ取り出し技術の開発について、その概況をご紹介させていただきます。

IRID は 2013 年 8 月に、2 年半前に設立されております。東京電力をはじめとしまして、国内の原子力発電をおこなう全ての会社、それから、3 つの主要な原子炉メーカー、さらに再処理事業者も含めまして、国内の原子力事業所、すべての知見を集結して、問題の解決にあてるという体制をとりました。

また、その中での国の JAEA ですとか、産総研の支援も得られております。

ひとつ飛ばします。IRID は役割、立ち位置といたしましては、NDF からの戦略、研究計画の提示を受け一方、東京電力ホールディングスの、彼らは IRID の組合員でもございますけれども、参加しておりますけれども、ユーザー側のニーズをしっかり IRID の中にインプットして、そういったニーズに十分配慮して、研

究開発を進めております。

IRID では、デブリ取り出しのための技術開発を大きく分けて3つ、やっております。

まず左上のほうでございます。

除染・線量低減技術と書いてございますが、こちらは調査含めて、作業全般の環境の改善がまず目標となっております。左下の原子炉格納容器補修・止水技術開発でございます。

これは、燃料デブリ取り出しのために、当初、格納容器に水を張りましょう、と。こういう目論見で、まずそのために格納容器内から漏れている水の経路をきちんと把握して、水を止めましょうと、そういった技術開発を開始しております。

その右、中段下でございますけれども、原子炉内調査・分析技術というのがございます。

これは燃料デブリの所在を探ること、つまりファクトを求めるといこと、それから燃料デブリの性状を把握したり、予測したり、あるいは設備の損傷を、実態の損傷のファクトを調べると、こういったことを目的としております。こういった3つのプロジェクトが右上になりますけれども、燃料デブリ取り出し技術の開発を支えると、こういった構成で技術開発をしております。特に取り出し技術の開発では、リスクマネジメントが十分にできる、そういう設計をするのだということで、例えば長期間にわたる PCV や RPV の耐震性の評価ですとか、デブリ取り出し、デブリを触るにあたって、未臨界を防ぐためのこういったことをしていっていただろうかと、こういった技術開発もおこなっております。

はじめに、遠隔除染技術の開発について少しご説明したいと思います。ひとつ、飛ばします。

遠隔除染技術の開発につきましては、やはり高線量の個所でございますので、ロボットを使うという発想からスタートしております。最初に汚染の形態というものを調査、実態を調査いたしました。

簡単なことでございますけれども、しかしながら、セシウムが主な線源であること、それからセシウムの付着形態につきましては、ごく表面に軽く付着しているものと、あるいは一方でエポキシ塗装ですとか、コンクリートの表面に深く浸透している場合があることが分かりましたので、こういった調査結果に基づきまして、例えば掃除機のように吸引する方式ですとか、あるいは高圧水のジェットで吹き飛ばす方式、あるいはドライアイスブラストで表面を研削する方式、こういったものの適用を続けております。

また、分布の条件につきましては、いくつかの場所の線源調査を事業者さんでしていただいたわけですが、結果としては高い個所からの空間線量の寄与も無視できない、非常に高いということが分かりまして、図にございますような、長く伸びて、高所を除染するようなシステムも開発してまいりました。

で、こういったものが既に現場で適用開始されておりますけれども、まだまだ、課題としてたくさん残っております。

例えば、こういった装置ですけれども、建屋内の一部にしか、なかなか届かない。ということによって、空間線量の大幅な低減にはいたってない。こういった課題がありまして、さらに除染の方法、技術開発の余

地がございまして、研究開発を進めていっております。

こういったロボットですとか、高所用の作業車の応用で、基本的に既存の技術の組合せで進めているわけなんですけれども、一方で新しい技術の適用も柔軟におこなっている次第でございます。

例えば、真ん中の図で、分かりにくくて申しわけないのですが、一般にロボットのカメラ映像のみですと、オペレーターの操作が非常にしにくいということがいわれておりました。

こちらは事前に 3D のレーザーマッピングで現場のマップを作っておきまして、ロボットの位置、自分の位置をリアルタイムで計測しながら、鳥瞰図のような画面を作成して、自分の位置を知ると、こういった操作の難易度を緩和するような最先端の技術というのも柔軟に適用しております。それから、格納容器補修技術の開発につきましては、デブリ取り出し作業の構成を作ること、特に放射性物質の追加放り出しの低減ということで進めてまいりました。

水張りが今後、格納容器にできるかどうかというのは、これからの技術開発にかかっておりますけれども、仮に水張りがおこなわない場合でも、冷却水の循環ですとか、あるいはデブリの切削時に発生する高濃度の汚染水の回収ルートを確保するという意味で、やはり PCV の補修をして、止水をするということは、非常に必要なことだと考えております。おおざっぱに言いますと、かなりの箇所を点検して、補修の有無を判断して、必要に応じて補修をするということは必要になります。

図に書くと、簡単に書くとこのような形、補修の必要な箇所になりますけれども、個々にペネトレーションの数を数えますと、数百をこえるような状況になっておまして、いかに被ばくを抑えて、そういった補修作業をするかと、大きな課題に直面しているところでございます。

また、現段階の漏えい箇所、できるだけ早い時期に止水するという点では、格納容器の下部でございますけれども、サブプレッションチャンバーと呼ばれる周辺、そのあたりがターゲットになると考えております。

これまでの事業者さんのロボットによる調査で、いくつかの漏えい箇所が判明しておりますので、それをどういうふうに遠隔で止水をするかということが、現在、大きな開発課題になっています。

ちょっと、こまかい絵図で恐縮なのですが、IRID でやっていますサブプレッションチャンバーの止水方法を大きく分けて、2 つございます。

ひとつめが左側、バント管と呼ばれる PCV から伸びてくる通気管でございますけれども、ここに閉止インプレーターを打って、その上にグラウトを打って、固めてしまうという方法がひとつでございます。

これも 1 年半ほど続けておりますが、なかなか完全な止水にはいたっておりませんので、今後も技術開発が必要な状況になっております。

一方で右側にございますように、ほぼサブプレッションチャンバー内部をグラウトで埋めてしまうよう、こういったダウンカマー止水と私ども呼んでおります。これですと、非常に止水の状況、よくとれることが判明しております。ただ、この方法ですとサブプレッションチャンバー全体の重量が増加しますので、耐震性への影響、こういったものを別のプロジェクトで評価する必要が生じてきております。

また、こういった、グラウト止水方法というのは、なかなかおそらくやり直しもきかないものですので、こういったモックアップ試験の計画をしております。この写真にございますのは、福島第一に近い、楡葉に JAEA が建設した楡葉の遠隔技術開発センター、この中に一角を借りうけて、実規模、セクションを 8 分にしてありますけれども、サイズは実規模のサプレッションチャンバーおよび周辺機器のモックアップを作っております。で、こちらで実際にグラウトウツド止水試験というのを 2016 年度、あるいは 2017 年度に実施する予定でございます。

ファクトを求めるといって、あるいは、それをデブリ取り出し工法の詳細設計のために、いろんな計画をしております。何度か、さっきの方にご紹介していただきまして、また外でデモンストレーション、あったかと思いますが、左側の形状変化型ロボット。これは 1 号機の PCV 内の様子、昨年度に、1 号機の PCV 内に入りまして、状況を明らかにしてまいりました。右側、サソリロボットと愛称が書いてございますけれども、こちらは昨年 8 月に導入予定だったのですが、現場の汚染、線量率が下がらないということで、2016 年度中に投入を実施しようと考えています。

こちら 2 号機のペDESTAL と呼ばれる、原子炉容器、直下の部分に侵入させまして、デブリの拡散状況ですとか、ペDESTAL の損傷状況を調査するというで、おおいに成果が期待されているものでございます。その先でございまして、A1、A2、B1、B2 といいまして、とりあえず格納容器内になんとか侵入して、経路を作るという意味では、大きな成果をあげることを期待されてはいますが、やはりデブリ取り出し工法確定にむけては、燃料デブリの所在、あるいは分布、組成を綿密にできる限り知ることが必要だと考えています。そのため、私どもでは、A3 とか B3 ですとか新しいプロジェクトを計画しております、2018 年度にかけて格納容器底部のデブリの分布の様子を明らかにしようと考えております。こちらは飛ばします。

また、圧力容器内部の調査でございます。

同じ RPV の調査での期待事項も一部、PCV 内部調査と同じでございます、デブリの分布状況ですとか、あるいは炉内の損傷状況を調べることでございますが、特に重要なのは、もし炉心部に残存燃料があった場合は、水張りをした時に臨界のリスクはやや高くなりますので、こういった残存燃料が残っていないかということ、きちんと調べるということが、大変重要と考えております。

現行では圧力容器の上部から穿孔いたしまして、ステップごとに下のほうに進んで、最後は炉底部まで調べに行くと、そういう計画でございます。

また、何度か先に紹介されましたが、ミュオンを使って、可視化技術を使って、炉内の調査もしています。これは、高エネルギー研究所ですとかロスアラモス研究所の基本技術の支援を受けております。

左下が 1 号機のミュオンの調査をした時の結果です。分解能も 1 メートルくらいと言われておまして、はっきりとは見えないのですけれども、格納容器、あるいは原子炉圧力容器、あるべき場所にあるというこ

と、それから、炉心部には高密度の大型のもう物質はないということが、確認されておりまして、別途、解析の評価等で得られているものと同じ結果が出ております。こういった実機調査でファクトの把握にいたっていない状況では、炉内状況の解析評価が非常に重要な役割をはたしています。

IRID におきましては、EPRI の作られました MAAP ですとか、IAE の作られました SAMPSON といった解析コードを使いまして、あるいは国際連携という形で OECD/NEA の BSAF のプロジェクトに参加して、炉内状況あるいは炉内調査の進め方に、重要な示唆をたくさん、いただいております。

最近の評価結果の一例でございますけれども、ペDESTAL 下部での溶融デブリとコンクリートの相互作用、こういった MCCI がどのように起こっているのかですとか、格納容器内底部でデブリがどのように広がっている可能性があるのかということの評価をいただいております。今後も BSAF の活動と連携を深めまして、損傷の解析を深めていきたいと考えております。

ひとつ飛ばします。もうひとつ飛ばします。

取り出し方法の設計でございますが、やはりリスクマネジメントがしっかりできるような、そういった設計をしなければならぬと考えております。まず、燃料デブリの収納、移送、保管でございます。

こちらは上のほうに TMI の事例のポンチ絵を書かせていただきましたけれども、先ほど、パクシュ原子力とか TMI、アイダホ研究所、それから NNL といったところから私どもも、いろんなことを今まで教えて頂いています。これからも、そういった海外からの経験あるいは教訓というものを、こういった収納、移送、保管、あるいはデブリ切削そのもののプロジェクトについて、適用していきたいと思っています。

また、デブリ取り出しのリスクマネジメントにおきましては、デブリを触った時に、新たに臨界のリスクが発生させないかという点において、臨界管理の評価技術が重要と考えております。また、40 年にわたるデブリ取り出しを、安全に着実に進めるために、例えば耐震性の評価、40 年間、構造物がきちんともつかどうか、あるいは、もたなければどこを補強するべきなのか、あるいは、どういった終局に備えるべきなのか、こういった解析を別途しております。こういったことを総合いたしまして、燃料デブリの取り出し工法の技術構成を考えているわけでございます。

しかしながら、完全な止水を達成する技術は、今のところ開発中でございます。

アクセス方法、取り出し方法というもののアイデアでございますが、今のところ、工法についての計画は策定されておられません。特に、安全性の確保という意味では放射性ダスト処理システム、臨界管理システム、循環注水冷却システム、内部ガス管理システム、こういった 4 つのシステムのご概念検討、それから高度化を図ることが必要だと思っておりますし、そのためには安全上の要求事項ですとか、機能の要求事項を明確にすることが、必要でございます。その他、こういった設計をするにあたり、リスクマネジメントが可能であることはもちろんでございますけれども、コスト、あるいは、デブリ取り出しに要する所要時間、そういったことも設計のほうで、十分考えていく必要があると考えております。

まとめでございます。

IRID でしている開発プロジェクトを紹介しました。 私ども、キーテクノロジーと考えているのは、高線量下での厳しい挑戦でありますゆえ、放射線の遮蔽、飛散抑制技術、遠隔作業の技術、可視化の技術、こういったものがキーテクノロジーと考えております。

また、安全を確実にするために、海外でのデブリ取り出しの実績、経験、教訓の導入、それから、安全設計方針を策定して、早い時期に規制当局との対話をさせていただこうと。

そして、最後は、模擬試験、モックアップ試験による検証と十分な訓練、こういったものを総合的に考えながら、じっくりと進めていきたいと考えております。 以上でございます。

越塚：

どうもありがとうございました。

それでは、パネリスト、最後のご発表をお願いしたいと思います。

原子力損害賠償・廃炉等支援機構、NDF の執行役員 技術グループ長の福田様でございます。

で、福田様からは福島第一の燃料デブリ取り出し戦略についてお話しいただきます。

それでは、よろしくお願いいたします。

福田：

はい、越塚先生、ご紹介ありがとうございます。

皆さん、こんにちは。 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 NDF の福田でございます。

今ほど、IRID の高守さんから技術開発の状況について、大変分かりやすい丁寧なご説明がありましたので、私のほうからは燃料デブリ取り出しの戦略というところに少し特化して、ご説明をしたいと思います。

そもそも燃料デブリとは、どういうものかということですが、とある定義によりますと、燃料集合体、制御棒、炉内の構造材とともに溶融して固まった燃料であると。 実際の原子力発電所における燃料デブリの例として、ネギンさんが紹介されたスリーマイルアイランドの例、あるいはストリゾフさんが紹介された旧ソ連のチェルノブイリの例、それから午前中、ウエイトマンさんがご紹介されましたけれども、ウインズケールの例等がございます。

さきほどゾーケさんがお話されたパクシユは燃料が損傷していますけれども、融けてはいないとおっしゃっていましたので、ある意味では、燃料デブリではないということかと思えます。 この写真を見ていただきますと分かる通り、原子炉の型式ですとか、事故の進み方等によりまして、燃料デブリの顔つきというのは、まったく異なっているということでございます。

そういう意味では事故を起こした発電所の取り組みですとか知見というのは、大変参考になるのですが、そのまま福島第一に適用するというわけにはいかないであろうと考えております。

燃料デブリの一般的な特徴といたしましては、核燃料物質を含んでいる、それから、被覆管等が融けていますので、閉じ込められていない、それから他の材料と混ざった状態で存在しているということです。

そのリスクということで考えますと、臨界ですとか、冷却、閉じ込め、あるいは強い放射線、水素が発生する等、考慮する必要がございます。このような燃料デブリのリスクを管理するという上で、その状態が十分、把握できていないという不確かさ、溶融した燃料ですとか損傷した施設であるという不安定さ、それから厳しい放射線環境でアクセスが困難であるということで、十分な管理ができないという大きな困難を抱えているわけでございます。

また、燃料デブリに関わる制度ですとかルール構築ということで、こういうものがないというのも、ひとつの課題になろうかと思えます。それでは、現在の燃料デブリの状況はといいますと、まずその放射エネルギーですけれども、事故に伴いまして揮発性の核種が放出しているですとか、減衰をしている等によりまして、事故当時の約数百分の1に大きく減少していると評価されております。

また、プラントパラメータ等によりまして、未臨界、冷却、閉じ込め、水素爆発防止等につきまして、原子炉マクロ的には安定な状態を維持しております。

例えば、格納容器内のガス中の希ガスの濃度を監視して、未臨界を確認している等、ということでございます。ちょっと、この図に、古いデータが入っておりまして、最新のデータは昨日、東京電力の増田 CDO から報告がありましたので、そちらのほうを見ていただければと思います。

それでは、NDFが昨年、発行しました戦略プラン2015の中では、福島第一の廃炉は事故により発生した通常の原子力発電所のない放射性物質によるリスクを、継続的かつ速やかに下げることが基本方針としております。燃料デブリのリスク低減について考えますと、閉じ込め機能が劣化する等、短中期的に顕在化するリスクの低減という観点と、長期にわたって、燃料デブリの環境への暴露を防止するという、長期的なリスクの低減という大きな2つの視点がございます。

このうち、われわれが当面、注力するのは、短中期的リスクを低減するというための戦略としまして、現在の安定状態の維持というのをベースに、一番目として、燃料デブリの状況や性状を把握することにより不確かさを減少させるということ。

2番目として、燃料デブリ取り出しによる炉内の状況の改善により不安定さを解消すること。

さらに、燃料デブリを安定な保管状態にして、管理レベルを向上させるということと考えております。

目指すのは、確かで、安定に管理された状態であると、そういうところに持ち込むことだと考えております。

但し、燃料デブリを取り出す時に、今日も議論がありましたけれども、作業時のリスクが増大することとありますので、これが大きく増大しないように、抑制するというための技術開発が大変重要な課題であると考えております。

日本では戦略といいますと、孫子の「彼を知り、己を知れば、百戦して殆うからず」というのが有名ですけれ

ども、これに倣いまして、敵である燃料デブリをよく知って、自らの技術を磨き、その実現性をよく知れば、燃料デブリの取り出しを達成できるという戦略を考えております。

これは戦略プラン 2015 の中で、燃料デブリのリスク低減のためのロジックツリーというのを提示しましたけれども、これは先ほど説明しましたベース、それから、1 番、2 番、3 番という技術要件を提示しております。ここでは、細かいので説明は省略いたします。

燃料デブリの戦略の第一歩は、敵を知る。すなわち炉内の状況を把握するということです。

現場の放射線環境が大変厳しいということで、先ほど IRID で、大変ご苦労をされてロボットを開発しているという報告がありましたが、格納容器の内部調査をしていますけれども、現状を実際に見ることができるというのは、大変限られた部分に留まっているというのが現実でございます。

すなわち、事前に隅々まで調査、確認をするということは、極めて難しい状況であると考えております。

このため、ここにありますように熱バランス法による評価ですとかプラントパラメータからの考察、あるいは先ほど紹介ありましたが、事故進展解析による解析、あるいは模擬デブリ、過去の知見等、最大限活用すると共に、可能なところからミュオン測定ですとか、格納容器内部の調査、あるいは圧力容器内部の調査を実施することによりまして、これらの結果を総合的に評価して、炉内の状況を推定することとしています。

それぞれのマイルストーンの時点で最も確からしい推定をもとに判断し、次のステップでさらに調査を進めるということを考えています。そういう意味では調査といえますのは、燃料デブリの取り出しが始まった後も、継続的に続ける息の長い活動であると考えております。

今のところで、最後のところですが、それぞれ判断をするというところで、ある程度の推定に基づいて、ベストエスティメイトに基づいてやるということになりますけれども、この推定の確からしさ、How sure is sure enough? というところの見極めが大切なポイントになるのではないかと考えてございます。

燃料デブリの取り出しの方法を検討するという上で、われわれが知りたい情報は主として 3 点あります。

まずは、燃料デブリの大まかな分布、すなわち炉心部、炉底部、格納容器の底部、それも原子力圧力容器の基礎でありますペDESTALの内側、外側、それぞれどのくらいの燃料デブリがあるのかということ。

次に、リスクの高い燃料デブリが存在しているか。例えば臨界リスクの観点からいいますと、炉心部に融け残った燃料、いわゆる切り株燃料というようなものがないのかということ。

最後に、機器の損傷状態。例えば燃料デブリが格納容器底部のコンクリートと反応した、いわゆる MCCI 生成物ですとか、ペDESTALがどのような状況になっているのか、というようなことでございます。

この図は戦略プラン 2015 でわれわれが推定した 1 から 3 号機の炉内の状況を示しております。

先ほどもちょっと紹介ありましたが、1 号機では燃料デブリの大部分は格納容器の底部に落下し、一部はペDESTALの外側まで広がっているのではないかと推定をしています。

2号機では、燃料デブリの一部は圧力容器の底部に、また一部は格納容器の底部に落下していると推定をしております。

ただ、最新の評価結果でいいますと、炉心部には、ほとんど燃料デブリは残っていないのではないかと。さらに多くの燃料デブリが格納容器の底部まで落下しているのではないかという評価も出ているところがございます。現在、精査をしております。

3号機は1号機と2号機の間隔的な状況であると考えてございます。

次は己を知る、すなわち燃料デブリに向けた技術を開発し、実現性を確かめるという戦略です。

福島第一の燃料デブリの取り出しといいますのは、これまで世界で誰も実施したことのない極めて難易度の高い作業であると考えております。

このため、われわれはこの図に示したように、政府の定めました中長期ロードマップに従い、技術の成熟度というものを一段ずつ高めていくということで、最終的に燃料デブリ取り出しを実現していくことを目指していこうと考えております。

先ほど、モックアップですとか訓練が重要というご指摘もありましたけれども、こういうこともこの中に組み込んで、しっかりと進めていきたいと考えておるところでございます。

実際、燃料デブリ取り出しの方法といいますのは、除染も含めて、燃料デブリに至るアクセスルートを構築する、そこまで機器や装置を搬送していく、そして、燃料デブリをさまざまな視覚、計測技術を用いて確認をする、集塵しながら切削し、それを回収、搬出するというような一連の作業になります。

この作業を実施する際には、安全の確保というのが絶対ですけれども、中でも燃料デブリに近づいて、これを切削するということをやりますので、この切削した粉を含んだ汚染水の漏えい防止ですとか、ダストの飛散防止といった閉じ込め機能の構築ということ、それと、極めて高い放射線から作業者を遮蔽するという被ばく低減が重要な課題となろうかと思えます。

1から3号機のそれぞれの状況を踏まえまして、これらを実現する最もふさわしい方法を、5つの基本的考え方、安全、確実、合理的、迅速、現場指向ということに基づきまして、選定をしていこうと考えております。燃料デブリ取り出し作業時には、冷却水を活用しまして、燃料デブリ等を冠水し、ダスト飛散防止や水遮へいによる被ばく低減をはかるというのが、通常かつ確実な方法と言われております。

一方、格納容器の水位を上昇させるためには、事故で損傷した格納容器の補修、止水という大規模かつ難しい工事が必要、あるいは大量の水を溜めると、大規模な漏えい事故の想定も必要になると。

それから、水荷重による地震時の構造健全性の確認が必要になる等のデメリットもございます。

このため格納容器内の水位上昇のメリット、デメリット、そのための技術の実現性、また燃料デブリがどこにあるのかということも勘案しまして、この水位というのを設定していく必要がございます。

通常、炉心への燃料のアクセスは上部の原子炉建屋オペレーティングフロアからというのが普通ですけれど

も、先ほど申し上げたように、燃料デブリが格納容器の底部にまで広がっているという状況があると想定されていますから、横や下という、その他のアクセス方法も検討をいたしました。

この、上、横、下という 3 つのアクセス方向、それから完全冠水、冠水、気中、完全気中という典型的な 4 つの PCV 内の水位の 12 通りの組み合わせの中から、水の流出可能性あるいはアクセスルートの構築性、冷却性能の評価のような観点を考慮しまして、実現性を重点的に検討していくべき工法を、3 つにわれわれは絞り込みました。

燃料デブリ取り出し工法の開発ということに関していいますと、冠水-上アクセス、気中-上アクセス、気中-横アクセス、という重点 3 工法に対しまして、概略の作業ステップごとに安全確保のために必要なシステムというのを抽出し、取り出しに必要な機器装置の概念を検討し、それらに要求される機能の実現性を確認するための要素試験というのを現在 IRID で進めていただいているところでございます。

また、技術提案公募といたしまして、海外を含む複数メーカーより提案をいただき、開発も実施をいたしました。福島第一では事故の影響で、建屋損傷し、安全システムはいっさい使えない状態となりました。燃料デブリ取り出しを実施する際には、プラント全体のシステムを再構築するという必要がございます。特に重要なシステムとしては、先ほど高守さんからもありましたが、放射性ダストの処理システムですとか負圧管理のシステム、あるいは漏えい水回収、浄化を含めた循環冷却のシステム、臨界管理のシステムなどがあります。これらの仕様を定めて、実現性ですとか配置可能性を検討していく必要がございます。

また取り出した燃料は安定した保管に持ち込むということとしていますが、先ほど高守さんのほうからご紹介ありましたように、現在 TMI の実績をベースに収納、移送、保管ということの技術開発を進めております。

このスリーマイルとの違いも考慮した検討、あるいは保管場所、方法、あるいは保障措置ですとか計量管理方法というところを検討していくという課題がございます。

福島第一の燃料デブリの取り出しというのは、世界にも類のない技術開発のプロジェクトです。

このため IRID 他で進めております実用化、現場適用に向けた技術開発にくわえ、JAEA の楯葉遠隔技術開発センター等の開発拠点の整備、さらに NDF が事務局となって進めております研究開発連携会議における基礎基盤から実用化にいたるまでの研究開発の一元的マネジメント、ニーズとシーズのマッチング、人材育成等、関係者が連携して国の総力を挙げて推進することとしております。

最後のまとめは繰り返になりますので、ここでは省略をいたします。

ご静聴ありがとうございました。

越塚：

どうもありがとうございました。

それでは、次にパネルディスカッションの時間に移らせていただきたいと思います。パネルディスカッションは 20 分ございまして、うち 15 分につきましては、パネリストでディスカッションしまして、あとの 5 分を会場から

の質問受け付けということで進めさせていただきたいと思います。

まず、パネリストの皆さんには今日、貴重なご発表をいただき、ありがとうございました。

特に海外からのパネリストの方には、非常に貴重なお話をいただきまして、ありがとうございます。

まずパネリストのディスカッションにつきましては、私のほうからご質問したいと思うのですが、われわれ福島第一原発のデブリの取り出しという、大変困難な作業をこれから実施していかなければならないわけです。例えば、米国の TMI のお話、それからハンガリーのパクシュのお話を聞きますと、今日のスライドでは特に写真がたくさんございまして、そういうのを見ておりますと福島デブリ取り出し、大変、困難なのですが、海外ではデブリ取り出しを実際におこなって、完了されている経験があるということで、技術的なデブリ取り出しの可能性については、実感できたというふうに思いました。

私からの質問なのですが、まずネギンさんにはデブリ取り出しの作業では、なかなか電力会社だけでは困難なところもあって、DOE の役割が大変重要であったというのが、最後おっしゃっていたことかと思えますけれども、そのへん、もう少し教えていただければと思います。

それから、ストリゾフさんにつきましては、チェルノブイリのコリウム、デブリについては、調査をされていて、組成等も調べられておまして、それが福島デブリ取り出しに、どういう有益な情報があるのかというのを、もう少し教えていただければと思います。

それから、ゾーケさんには、やはり発表の中で、電力会社だけではなかなか難しく、多くのロシアそれからハンガリーの企業から支援を受けて、デブリ取り出しに成功されたというお話をされておりましたけれども、そのへんについても、コメントいただければと思います。

それでは、順番にお話をお伺いできますでしょうか。

C.A.ネギン：

分かりました。この DOE について聞いていただきまして、ありがとうございました。

スリーマイル島事故におけるエネルギー省の関与についてですが、事故後 3、4 ヶ月たった段階でしょうか、エネルギー省は現場にオフィスを設けているのです。

フィールドオフィスというものでスタッフの数として 20 名、25 名くらいになるのですが、必要に応じて DOE の(本省の)スタッフや経験等の資源を使える立場です。

とても近くて密接な関係ですが DOE が GPU(電力会社)の責任を引き受けてしまって、全部、自分でやるということではなくて、連携ができたのです。

さっきも言いましたが、事業者である GPU は技術的なリソースを持っていないし、権限も持っていません。よって、DOE の関与はとても重要で炉心を掘削する機械の開発においても関与しました。最初は調査のサンプリングのためでしたけれども、後に本格的に使うようになりました。これが果たした最も重要

な役割は2つありその一つは、通常ではない廃棄物、セシウムとストロンチウムの濃度が極めて高いゼオライトを含むもの、これは通常の原子炉の廃棄物の処分では対応できないもの。それから、あとは燃料デブリ、この2つの側面で重要でした。この廃棄物の側面につきましては、限られたコンテナの数ではありましたが要は通常の処分では対応できないものでしたけれども、DOE が高健全性コンテナというものを設計して、ハンフォードで廃棄する対応をしたわけなのです。

米国で高性能容器を廃棄物に対して使ったのはこれが初めてじゃないでしょうか。

この方法で処分をするのでなければ、それらの容器については有機樹脂を取り除いて、グラウトと混ぜて、安定化をして、そして希釈して処分をするという選択肢しかなかったのです。

私自身もそのどちらがいいのかの DOE の調査に携わりましたけれども、潜在的な被ばく、困難さ、それから施設の規模等々を検討しまして、あまりにも大変だということになって、それで、この高性能の高健全性容器にしようということになったわけです。

もう一方の燃料デブリですけれども、ゼオライトのコンテナについても、同じような背景だったわけですが、燃料デブリについては、それを島に埋めるわけにはいかない。例えば、米国で人口のあれだけ多い州の隣の川の向こうの島に埋めるなんて無理でした。結局、その島をやめて、アイダホに持っていったわけです。これを DOE の下でやったわけです。電力事業者が資金を出しました。

技術的な側面はとても大変でした。興味深かったのは、DOE と NRC が連携してやったということです。鉄道で運ぶために、特別な容器が必要でした。NRC は、そのキャスクの安全要件を承認しなければなりませんでした。これを1年半くらいでやったので、記録的な早さだったのですけれども、とにかく全体の工程をそれがあつたからこそ守れたというのは、とても良かったと思います。

越塚：

どうもありがとうございます。お願いいたします。

V.F.ストリゾフ：

議長、ご質問ありがとうございます。

事故はそれぞれ特異なわけです。ですから、類似性を見出すのは極めて難しいのです。

私が申し上げたいのは、これまで世界でいろんな実験活動が行われてきました。それによって、一部、結論が出てきました。例えば、デブリの形態はどんなことが予想されるのかとか、デブリがどこに発生しうるのかということです。そういう観点から、これらの実験の結果は、特別なシビアアクシデントよりも福島状況には、適用できるのではないかと考えています。

TMI はもしかしたら2号機の状況と似ているかもしれませんが、TMI の事故とも違うし、さらにチェルノブイリとはまるで違うことだと思います。とは、申しましたけれども、このプログラムの中で重要なデータが取得できました。

例えば、デブリの特性、さまざまな特性があります。固体状態、液体状態、それから、またデブリにもさまざま

まな相があります。事故の間に、デブリの相がどのようになったかを知ることが非常に重要です。

越塚：

ありがとうございます。 それでは、ゾーケさんお願いいたします。

L.ゾーケ：

パクシュ原子力発電所の事故は運転中のプラントで発生しました。

そのプラントは 20 年以上にわたって運転をするつもりでいたプラントです。 損傷燃料に対応できるように設計されているプラントはありません。 こういった特定の状況に対応する技術が、当時はありませんでした。 ご存知かもしれませんが、パクシュ発電所の設計はロシアのエンジニアリングでやっています。

そして、燃料の供給も操業開始からロシアでした。 その中で、この事故がパクシュ発電所で起きました。

どこが、この難しい状況の中、助けてくれるのかと考えました。 幸いにもロシアの TVEL 社が一番いい提案をしてくれました。 何でベストかという、そもそもわれわれの原子炉について一番よく知っている、技術について、燃料についても一番分かっていると同時に、適切な技術を設計する能力を持っていたからです。 もちろん、ロシアの組織だけではありませんでした。 先ほども触れましたように非常に保守的なアプローチをわれわれは取ろうとしました。 それぞれの技術とかそれぞれの分析、解析の評価は少なくとも 2 つの独立した機関にお願いをしました。 その中で、多くのハンガリーの研究機関、それから設計をやっている組織が関与をしました。

よって、われわれの場合には、連携をしたことによって、この良好な結果が得られたと思っています。

ありがとうございます。

越塚：

どうもありがとうございました。

それでは、あと日本からのパネリストの方にお伺いしたいと思います。

ご発表でもありましたが、こうした世界の経験については、よく調べられているということでありますけれども、やはり実際にデブリの取り出しを最後まで完了されている世界の経験というのは、非常に貴重なものだと思います。 また、海外の方には、ご助言とかご助力をいただいて、福島の前記取り出しの成功につなげていけるようにしていくべきかと思います。

この点、世界の経験ということにつきまして、もう少し、ご意見、コメントいただけますとありがたいと思います。 高守様いかがでしょうか？

高守：

はい、かなり調べられていると先生おっしゃっていただきましたが、私どもは、まだまだ本当に足りないと思っています。 デブリ取り出しする要素技術という点では日本のプラントメーカーは、様々な適用できるものを持っていらっしゃるなど私は、感じておりますし、また、皆さんのサプライチェーンの中にも優秀なメーカーがいて、

多分、こういう組合せの中から、できていくのだろうなという感じがしています。

ただ、それでデブリ取り出しができるのかというと、そうではなくて、やはり原子力安全、それからリスクマネジメントという観点で、海外の方々が、どういう方法を考えて、どういう理由でそれを選んだのか、そういったノウハウをもっともっと私たちは学ばなければいけないと思っています。

去年も何度か IRID のメンバーが、パクシュ、TMI、PNNL、それからアイダホ研究所などを訪問し、いろんなことを教えていただきました。例えば水素発生についてどう考えるか、どう処理するのか、どのように意思決定されて、そして、どういう選択をしたのかと、それから技術的にどういうデバイスをそのために作ったのかと。

こういうこと、はっきり説明してくださって、ひとつひとつデブリの取り出し方、臨界管理の仕方、それからリスクマネジメント、それを地元の方々にどうぞ説明して、ご了解いただくのか。全般的に私たちはまだまだ学んでいかなければならないことはたくさんあると思っています。

これからもご協力お願いしたいと思います。

越塚：

はい、ありがとうございました。

それでは、福田様、いかがでしょうか？

福田：

はい、高守さんが総括的に述べられたので、あまり付加するところはないのですが、まさに私もプレゼンの中で言いましたけれども、事故というのは、やっぱりユニークなものなので、必ずしも直接適用できるものではないということではありますけれども、まさに、その事故の時に、どういうマネジメントをされたか。あるいは、規制も含め、地元も含め、どういう対応をされて、うまくいったのかというところは非常に参考になる部分があるかと思っています。

われわれ、もう 30 年も前のことですが、TMI の時にどんな形で許認可をされたのかというようなことも、最近少し改めて勉強した方がいいかなと思っておるところでございます。また、個々の技術につきましても、やはり文献だけではよく分からない、その時にどのような判断されたのかというところの、いろいろやはり、それぞれ成功するためには、ご苦労されて悩んで決められたところというのがあるというのは、いろいろ聞いてくると分かってきています。そういう、どういう判断をする時に何をよりどころに、どう判断をしたのかというようなことも、いろいろ教えていただくと、今度われわれはどう判断していけばいいのかということに極めて参考になるのかなと考えてございます。

もう 1 点、ストリゾフさんがおっしゃったように、スリーマイルの時ですとか、そのあとチェルノブイリを経験して、そのデブリはどういう挙動をするかですとか、解析技術もかなり進歩をしているのではないかと思います。そ

いう意味で、先ほどストリゾフさんのほうから、いろんな知見が増えたということを教えていただいていますけれども、そういうのも国際的なプロジェクトの中で、われわれいろいろお伺いして、それを反映したうえで、1Fのプロジェクトの中にも活かしていければと考えているところです。

越塚：

どうもありがとうございました。 どうもパネリストの皆さん、ありがとうございました。

では、会場から質問を受け付けたいと思いますけれども、いかがでしょうか？

質問ございます方、手を挙げていただければ。

よろしいですか？ はい、ではお願いいたします。

質問者：

じゃあ、よろしいですか。 では、簡単に。

昨日と違いまして、今日は非常に専門家が多い、あるいは専門家にとって非常に興味のあるところですが、一般人として、ピープルの視点というかで、ちょっとお伺いしたいのですけれども、ちょっと見てみると、3つ大きな死体のようなものが並んでいるのですけれども、昔の日本ですと、土葬でそこに埋めてしまうということがあったのですが、都市化するにつれて、土地が無いということで、荼毘にふして、灰にするということをするようになってきたわけです。

今日のパネリストの方もアメリカとかロシアですと土地がすごく広い。 ハンガリーの方は隣じゃなくて元の国に戻された。 日本の場合は、じゃあ、これだけ人口密度が、一応は広い土地ありますけれども、原子力の関係者にとっては、そんなに広い土地があるわけではない。 その場合、お葬式にみたてるのはいいかどうか分かりませんが、荼毘にふすというようなオプションは専門家として、ありうるのでしょうか？ という、ちょっと伺いたい。

越塚：

すみません、ちょっと抽象的だったのですけれども。

質問者：

すみません。使用済燃料をそのまま捨てるというのではなくて、再処理というのはオプションであります。同じようにデブリを例えば原子炉で燃してしまうとか、あるいは化学的分離して、言ってみれば、骨壺に収めるような形で、コンパクトにできないかということです。

越塚：

取りだしたデブリの後の処理ですね？

質問者：

はい。

越塚：

はい、いかがでしょう。どなたか答えられます？ NDF でしょうか？
取り出したデブリのその後の処理については、現状ではどういふふうに考えておられるのか？

福田：

はい、現実的にはまだ取り出す方法を考えるところに手いっぱいというところが実情でございまして、一応、国の作った中長期のロードマップにおいても、取り出した燃料デブリの処理、処分をどうするかというのは、第 3 期ということで、取り出し始まった以降に具体的に決めましょうということになってございます。
取り出した燃料を、原子炉で燃して、核種を消滅させることができるのかということに関しては、私は専門家ではないので分かりませんが、そのような研究をしている方もいらっしゃいますし、そういう技術は開発中だとは聞いております。ただ、福島に適用するかどうかということは、そういう検討はまだしてありません。

越塚：

はい、デジジョンは慎重に、ということかと思えます。それでは、時間になりましたので、申し訳ないですけども、これでこのパネルはラップアップさせていただいて、終了させたいと思えます。
それでは、ラップアップということで、ネギンさんにお話をまとめていただければ。

C.A.ネギン：

はい、パネリストの皆さま、だいたいのコメントを私が触れるべきポイント、すべて、カバーしてくださったと思えますけれども、2 つだけ申し上げたいと思えます。

ひとつはどんなに計画をしても、やはり想定外のことが起きます。つまり予期していなかったことが起きることが必ずあります。このことを認識しておいていただきたいと思えますし、それに対応しなければならないことが起きます。

それから、中間ステートとエンドステート。まず容器に燃料を入れて、そして、どこかに貯蔵して、どこに処分するのかという、最終処分は後で決めることになるわけです。

減容に関しては、他の使用済燃料はどうするのか、他の原子炉も運転して、そして使用済燃料が出るわけですね。福島からだけの容量を見て多いということですけども、他の発電所からの使用済燃料を考えると少ないわけで、福島だけではなくて、国全体としての決定が必要だと思えます。

ということで、私のまとめは以上でございます。

ありがとうございました。