

第15回原子力委員会定例会議議事録

1. 日 時 令和6年5月21日（火）14:00 ～ 15:38

2. 場 所 中央合同庁舎第8号館6階623会議室

3. 出席者 原子力委員会

上坂委員長、直井委員、岡田委員

内閣府原子力政策担当室

梅北参事官

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

山内理事長、関部長

株式会社東芝 技術経営企画室

宮寺シニアマネジャー

原子力規制庁

天野安全管理調査官、奥安全規制調整官

4. 議 題

(1) ミュオンを利用した福島第一原子力発電所の測定及び今後の展開などについて

(2) 東北電力株式会社女川原子力発電所2号炉の発電用原子炉の設置変更許可（所内常設直流電源設備（3系統目）の設置等）について（諮問）

(3) 関西電力株式会社高浜発電所1号炉、2号炉、3号炉及び4号炉の発電用原子炉の設置変更許可（3号炉及び4号炉の蒸気発生器の取替え等）について（諮問）

(4) その他

5. 審議事項

（上坂委員長）時間になりましたので、令和6年第15回原子力委員会定例会議を開催いたします。

本日の議題ですが、一つ目がミュオンを利用した福島第一原子力発電所の測定及び今後の展開などについて、二つ目が東北電力株式会社女川原子力発電所2号炉の発電用原子炉の設

置変更許可（所内常設直流電源設備（3系統目）の設置等）について（諮問）、三つ目が関西電力株式会社高浜発電所1号炉、2号炉、3号炉及び4号炉の発電用原子炉の設置変更許可（3号炉及び4号炉の蒸気発生器の取替え等）について（諮問）、四つ目がその他であります。

一つ目の議題のミュオンについてですが、先週17日に、J-PARCセンター、高エネルギー加速器研究機構などの共同研究チームが、素粒子ミュオンを冷却し、光速の約4%までに加速することに成功したというプレスリリースもあつたばかりの注目の粒子であります。様々な分野で活用されているミュオンを、東京電力福島第一原子力発電所の状況確認に使えないかという観点で御説明を頂くと伺っております。

それでは、事務局から説明をお願いいたします。

（梅北参事官）事務局からでございます。

一つ目の議題ですけれども、ミュオンを利用した福島第一原子力発電所の測定及び今後の展開などについて、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構、理事長、山内様、同機構研究管理部部長、関様、株式会社東芝 技術経営企画室、シニアマネジャー、宮寺様から御説明いただき、その後、質疑を行う予定です。

本件は、「原子力利用に関する基本的考え方」の3の6、「廃止措置及び放射性廃棄物の対応を着実に進める」に主に関係するものです。

それでは、冒頭、山内理事長から御挨拶及び東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に関するコメントを頂き、その後、宮寺シニアマネジャーから資料に沿って御説明をよろしくお願いいたします。

（山内理事長）ただいま紹介がありました国際廃炉研究開発機構、略称IRIDの理事長をしております山内です。

本テーマにつきましては、福島第一の廃炉で、まず廃炉の初期の頃に必要な非破壊で炉内調査の技術ということで、IRIDが補助事業として受託をしまして、具体的な研究については東芝さんが開発をしたものでございます。

それでは、資料に沿いまして、そのミュオン散乱法の原理、それから活用事例、それから福島への展開、今後の期待、技術の応用について東芝の宮寺さんの方から説明をお願いします。

（宮寺シニアマネジャー）本日は技術説明の機会を頂き、誠にありがとうございます。東芝の宮寺よりミュオンイメージングについて説明いたします。

本日の内容はこのような流れでさせていただきます。

まずミュオン散乱法全般につきまして、イントロとして御紹介いたします。

宇宙線ミュオンにつきましては、近年いろんなところで話題になっておりますので、お聞きになられた方も多いかと思いますけれども、宇宙空間は非常に高いレベルエネルギーの電子や、陽子や、他のイオンが飛び交っております。そういった高エネルギー粒子が地球の大気と衝突した際に、湯川先生が予言された粒子ですけれどもパイオンという粒子を時々生成しまして、このパイオンは短寿命でミュオンに崩壊し、ミュオンは比較的長寿命であるため多くは地表に到達する、これが宇宙線ミュオンでございます。

地表では1分当たり、1平米にざっと1万個の宇宙線ミュオンが降り注いでおりまして、そんなに少ないわけではなくて、イメージングなどにこれまで活用されてきました。

宇宙線ミュオンの特徴としましては、エネルギーが非常に高いということがありまして、中心的なエネルギーは10の9乗電子ボルト、ギガエレクトロンボルト領域でして、平均的なエネルギー4 GeVのミュオンで7～8mのコンクリートを透過します。より高いエネルギーのミュオンはもっと分厚いものを透過できるので、大型建造物のイメージングに適している粒子でございます。これは加速器で生成されるミュオンの、ざっと2桁以上高いエネルギーになります。

もう一つの宇宙線ミュオンの特徴なのですけれども、降ってくる方向に角度依存性があるということです。真上から降ってくる宇宙線ミュオンが一番数数一番多くて、水平方向になりますと、ざっと1桁フラックスが落ちてくる。したがって、イメージングを行う上ではできるだけ真上方向から降ってくるミュオンを使うのが効率的なのをご理解いただけるかと思えます。

物質を宇宙線ミュオンが通過する際に、二つの相互作用をするのですけれども、ちょっと物理の紹介をさせていただこうと思えます。

一つ目がいわゆるイオン化損失と呼ばれる相互作用でして、これはミュオンが物質中を通過する際に、物質中の電子との相互作用で徐々にエネルギーを失っていきまして、完全にエネルギーを失ったミュオンは停止してしまいます。したがって、ミュオンの数、すなわちフラックスがどんどん減っていく、そういった相互作用になります。

二つ目の相互作用がクーロン多重散乱と呼ばれる相互作用なのですけれども、これは物質中の原子核とミュオンのクーロン相互作用でして、確率的にパチンコのようにポンポン散乱される、そういった相互作用になります。このとき、入ってきたミュオンの角度と出て行く

ミュオンの角度差、すなわち散乱角はこちらに示した式で表されるのですけれども、ざっくり言いますと、同じ厚さのものにミュオンが入っていったときに、平均散乱角は原子番号に比例する、そういった性質になります。

1 個目のイオン化損失によるフラックスの減少は、ミュオン透過法というイメージングに使われておまして、2 個目の散乱角を使った分析方法は物質判別ができるのですけれども、ミュオン散乱法と呼ばれるイメージングに使われております。

この一つ目のイオン化損失を利用したミュオン透過法というのは、意外と歴史が古くて、原理としては単純で検査器を1 個置かまして降ってくるミュオンの角度と個数を測定するというレントゲンみたいな測定を行うのですけれども、1950年代にE. P. George という方物理学者がオーストラリアのスノーウィーマウンテンの坑道に検出器を持ち込んで測定したのが最初だとされています。

60年代にも、ノーベル賞で有名なAlvarezがピラミッドに検出器を設置しまして、隠された部屋の探索というものを行っております。こちらについては類似の研究を名古屋大のチームが行い、2017年に隠された空洞が発見され話題になっておりました。

また、国内では95年に永嶺先生が筑波山のイメージングを行ったのが有名ですけれども、こちらは永嶺先生の測定結果ですが、透過法では大きい構造物の影を測定することになります。永嶺先生とKEK（高エネルギー加速器研究機構）のチームは福島第一原子力発電所の原子炉イメージングも行いまして、こちらは透過法を使って福島第一原子力発電所を見たイメージ図なのですけれども、いろいろな原子炉の構造物の影の撮影に成功しています。

ただ、ミュオン透過法の問題点としましては、物質を通過する際にミュオン自身が散乱を受ける性質によりまして、得られる画像の分解能がどうしても劣化してしまう、そういった欠点がありました。

そこで、9.11テロ後にアメリカのロスアラモス国立研究所でミュオン散乱法という比較的新しいイメージング方法が開発されました。ミュオン散乱法では、こちらに模式的に示した図のように、2 個のミュオン軌跡検出器で測定対象物を挟んで、入ってくるミュオンの軌跡のベクトルと、出て行くミュオンの軌跡のベクトルを測定しております。このとき、二つのベクトルを結んでできた交点に対象となる物質がありまして、このときの散乱角からその物質が何であるか、原子番号など物質判別ができる、これがミュオン散乱法の原理になります。

余談ですが、私は3.11が起きる前はロスアラモス国立研究所で核テロ対策のプロジェクト

クトチームを率いておりまして、もう十四、五年前の話になります。こちらのロスアラモスで開発しましたミュオン軌跡検出器、Mini Muon Trackerと呼んでおりますが、鉄と鉛のブロックのデモンストレーション測定を行ったのがこちらの動画になります。鉄よりも鉛の方が原子番号が大きいので、ミュオンをより大きく散乱させるのですが、こちらを見ていただくと分かりますが、鉄と鉛ぐらいでしたら本当に30秒もたたないうちに物質判別できております。

少し難しい話になってくるのですが、実はミュオン散乱法で、散乱角だけでは、例えば分厚いコンクリートと薄い鉄を区別できないので、何らかの解析が必要になってきます。大ざっぱに原理を説明しますと、ミュオン散乱法ではミュオン透過率も同時に測っておりまして、ミュオン透過率から分かるのは dE/dx 、イオン化損失なんですけれども、こちらは原子番号に比例する物理量となります。

また、ミュオン散乱角から分かりますのは、放射長という物理量なんですけれども、こちらは原子番号の2乗に比例する量です。

したがって、放射長と dE/dx の比を取ってやりますと、このように物質に特徴的な値、この図の傾きに相当する量値なので、物質を判別することができます。

私どもが使っておりますミュオン軌跡検出器の写真をこちらに出しておりますけれども、私どもはドリフトチューブ検出器という検出器を使ってミュオンを測定しております。このドリフトチューブ検出器は、アルミ製のパイプの中にガスが封じ込められており、宇宙線ミュオンが通過しますと電子雪崩のシグナルが発生します。したがって、ドリフトチューブ検出器をx y x yのように多くの層に並べて置くことでミュオンのベクトルを測定することができます。

ドリフトチューブ検出器で得られた信号をアナログ回路で増幅しまして、それをFPGA回路で時間情報をデジタル情報に変換し、コンピューターに転送し、そこで画像化する。これがミュオン軌跡検出器の構成となっております。

ドリフトチューブ検出器は高エネルギー実験で使われている検出器でして、それに対して私どもが使っておりますアナログ回路は比例計数管で培いました原子力原産技術でして、それとFPGAの民生技術、この三つの技術をうまく組み合わせたものがミュオン軌跡検出器になります。

ここからミュオン散乱法の応用例について紹介させていただければと思います。

こちらの写真にありますのは、社内で使っておりますミュオン軌跡検出器でして、上と下

のちょうど空いた空間、こちらに測定対象物を置いて、ミュオン散乱法でイメージングする装置になっております。

最初に申しましたが、ミュオン散乱法ではおおよその物質判別はできるのですが、宇宙線の中にはミュオン以外にも電子なども含まれておりますので、ミュオンと電子の散乱角、透過率、こういったものを組み合わせることで物質判別の精度を上げることができます。

解析方法としましては、いろいろな解析方法があるのですが、ここでは機械学習を使った解析方法について少し紹介させていただければと思います。

あらかじめいろいろな物質のミュオンの散乱角、透過率、あるいは電子の散乱角などをシミュレーションして学習させておき、未知の物を置いたときの判別に活用する、というのが機械学習を用いた解析方法となります。

こちらはミュオンの散乱を使ったシミュレーションで、シミュレーション結果を機械学習に掛けて判別した例ですが、ここでは、塩、水、麻薬、SUS、これについてはうまく判別できていることがご理解いただけるかと思います。もちろん社内では麻薬は使えませんので、こちらのシミュレーション結果です。ただ、アルミと砂糖についてはうまく判別できておりません。これはミュオンの結果だけを使っておりますが、例えば電子の散乱情報などを加えていくことで判別精度を向上させることができます。

ロスアラモスで開発されましたミュオン散乱法ですが、ロスアラモスで開発に携わった仲間たちがサンディエゴでベンチャー企業を立ち上げて、DSIC社という会社ですが、既にミュオンコンテナスキャナ、即ちミュオン散乱法でコンテナをスキャンする装置を上市しております。こちらは彼らが商品化したミュオン散乱法コンテナスキャナですが、屋根の部分と地面の部分に7m×14mくらいだったと思いますが大きな検出器が入っており、トレーラーを停めて数分間でスクリーニングしまして、もし怪しい結果が出ましたら例えば10分程度データをためる、そういった検査を行っております。

DSIC社のミュオンコンテナスキャナは既にバハマ、シンガポール、UAE、アメリカ・メキシコ国境に導入され、こちらはイメージ図になるのですが、ミュオン散乱法で、例えばこのウランのような申告されていないものが入っていましたらアラートを出す、そういった仕組みになっております。

特に、アメリカ・メキシコ国境に入れましたミュオンコンテナスキャナで、2019年にマリファナを摘発した事例がありまして、ちょっとした話題になっておりました。

これはそのときの写真なのですが、鉄製のコイルを積んだトレーラーがやってきた

そうで、最初はX線スキャンを行ったそうなのですが特に異常は見つからず、次にこのミュオンコンテナスキャナでイメージングしましたところ、このコイルの中に空洞があり、何か詰まってそうだと分かりましたので、実際にコイルを開けてみたら大量のマリファナが入っていたそうです。

コンテナスキャナ以外の応用としまして、社内でやっています研究成果を幾つか紹介させていただきますと、こちらは鉄筋コンクリート中の鉄柱の健全性検査です。インフラ検査に使えると思うのですが、このようなこういうイメージングにも取り組んでおります。これはシミュレーション結果になりますけれども、20センチ厚の鉄筋コンクリートを約1時間測定し、中の鉄筋の亀裂を判別できた例です。

また、ロスアラモス国立研究所では、プラントのバルブのイメージング、例えばバルブの開閉の正常・異常を判別する、そういったデモンストレーションも行っております。こちらは測定時間4時間ですけれども、プラントのバルブが開いているのか、閉まっているのか、詰まっているのか、そういったイメージングし、判別した結果です。通常、こういった検査のときにはプラントの運転を止めてから行うのが多いのですが、ミュオン散乱法はプラントの運転を止めることなくイメージングを行えるという特長を持っています。

ちょっとここから幾つかの原子力分野への展開について御紹介させていただければと思います。

最初に申し上げましたが、3. 11が来ましたときに、私はロスアラモス国立研究所で研究開発を行っていたのですが、その翌週にはミュオン散乱法によるイメージングで福島第一の炉内状況を解明できるんじゃないか、そう仲間たちと思い付きまして、机上検討を行いました。当時考えていたアイデアなのですが、ミュオン散乱法の検出器を炉外にこのように2基設置することで、炉心部分をイメージングできるんじゃないか、そう考えておりました。実は同じ頃、永嶺先生もミュオン透過法を使った福島第一のイメージングを提案されておりまして、永嶺先生と連携して、情報共有・情報交換を当時行っていました。

こちらは、2012年に散乱法と透過法を用いたらどのような結果が出るのか、私どもの方でシミュレーション検討を行い、論文発表した結果なのですが、一番左にありますが炉心の全くなかった場合、真ん中が健全な炉心があった場合、一番右が健全な炉心で、ここにちょっと少し穴が空いていますけれども、このように溶けてしまった場合などのケースでシミュレーションを行い、論文発表しました。上と下の結果を比べていただければ分かりますように、ミュオン散乱法の方がミュオン透過法よりもはっきりとしたイメージが得ら

れるということがご理解いただけるかと思います。

実際に原子炉をイメージングする際には、分厚いコンクリート越しに炉心をイメージングする必要がありまして、そんなことができるのかということで、ロスアラモスでも実証試験を2013年に行いました。こちらはそのときの体系なのですけれども、3m近いコンクリートを両側に置き、炉心に見立てました鉛をイメージングするという試験を行いました。炉心としましては、こちらのように円錐型に切り抜いた鉛炉心を構築しまして、それを分厚いコンクリート越しにイメージングしました。先ほど紹介した小型のミュオン軌跡検出器、1m×1mのMini Muon Trackerを使って測定を行いました。

こちらは20日間の測定を行ったのですけれども、確かに鉛の原子炉の炉心がここに映っているのが見えまして、真ん中の円錐状の切り抜きもイメージングできています。

この成果を受けまして、本物の原子炉を測定したいと思ひまして、世界中いろんなところで測定に使える原子炉を探したのですけれども、そのときに東芝さんの方で手を挙げてくれまして、実は川崎市の浮島に小型の原子炉、臨界実験装置という研究炉があるのですけれども、そちらに先ほどのロスアラモスの小型ミュオン検出器を運び実証試験を行いました。

実証試験の体系を示してありますけれども、直径40センチの円柱状の炉心の真ん中20センチを中抜きにし、スリーマイル事故の炉心のような炉心体系を組みましてイメージングを行いました。測定を開始して本当に数時間もたたないうちに、このように炉心が浮かび上がってきまして、最終的には4週間測定を行いました。

宇宙線ミュオン散乱法では、データ自体は三次元で保存されていますので、いろんな断面で解析して画像化できるのですけれども、例えばこの炉心中央で解析した結果はこちらで、中空の炉心がイメージングできているかと思ひます。また、ここに燃料棒を置いているのですけれども、燃料棒位置で解析しますと確かに燃料棒が見えています。ここに障害物として鉄やコンクリートのブロックを置いているのですけれども、確かに鉄やコンクリートのブロックが画像で確認できます。この試験は2013年の夏に浮島で行ったのですけれども、世界初の炉外から原子炉の炉心イメージングに成功した事例でした。

この成果を受けまして、私もロスアラモスを辞めて、東芝に転職してきたのですけれども、その翌年には国プロで予算を付けていただきまして、福島第一原子力発電所のイメージングを行うために大型のミュオン軌跡検出器を開発いたしました。こちらは完成したミュオン軌跡検出器の写真なのですけれども、7m×7mの比較的大きい検出器で、先ほど紹介しましたドリフトチューブ検出器を6,720本使用しています。開発で苦労したことなのですけ

れども、通常のドリフトチューブ検出器では炭化水素系のガスが中に入っているのですけれども、福島第一で想定している放射線環境下で炭化水素系のガスを使ったドリフトチューブを使うと炭化水素が分解されてしまい性能が出せなくなってしまう、そういったことが分かりまして、私どもの方では非炭化水素系のドリフトガス、具体的にはアルゴン、二酸化炭素、窒素を使ったドリフトチューブ検出器を開発いたしました。

非常に残念だったのですが、このミュオン軌跡検出器は装置サイズが大きかったということもあり、福島第一での設置工事を社内でも随分検討をしたのですけれども、当時の福島第一の環境では設置工事の難度が非常に高く、最終的には検出器は福島第一には入れないという決断が下されました。非常に悔しい思いをしました。

この検出器の写真を見せると、一体この検出器って何十人の体制で何年間かけて開発したんだ、とよく聞かれるんですけれども、実は5人のプロジェクトで、8か月で開発しました。当時30代半ばの私と、大学院を出て間もない20代の4人でチームを組んで開発しました。ロスアラモスから来たばかりの私は、日本のメーカーの若手エンジニア・研究者は非常に優秀で熱意があると感動したのを今でも覚えています。

開発したミュオン軌跡検出器は福島第一に入れることは叶わなかったのですけれども、当時、私どもは7m×7mの検出器をタービン建屋のオペフロと原子炉建屋の外に設置して炉心を挟み、イメージングを行うことを計画しておりました。もし福島第一に入れることができれば、仮定になるのですけれども、シミュレーションによりますとこのような画像が得られたかと思えます。左が完全な炉心、右側が100%溶融した炉心、その間の溶融炉心の3か月間の測定に相当するシミュレーション結果を示してあります。

この中の50%溶融した炉心について、時間の経過とともにシミュレーション結果を紹介したのが下の図ですが、数か月の測定で炉心状態やデブリのイメージングができたのではないかと考えております。

ここから先はまた別のプロジェクトになるのですけれども、今後、福島第一でデブリ取り出しが本格化することが予想されております。この先、大量に取り出したデブリの管理が課題になると私どもは考えております。現状では、保守的に管理するとなりますと、全てのデブリに対して、デブリが全量ウランだと想定して管理する必要があるのではないかと、そのような懸念があります。この場合、管理コストや他のコストが非常に上がってしまうと考えておりまして、私どもは取り出したデブリの中に含まれていますウラン量を、例えばミュオン散乱法を使って測定してやることで、管理や保管を効率化できるのではないかと、そのような

考えで2017年頃から検討を行ってまいりました。

ミュオン以外のデブリに対する非破壊検査方法としまして、ガンマ線や中性子を測定する手法が考えられるかと思いますが、デブリはいろいろな組成でいろいろな密度であり、これらの情報が不明ですと、ガンマ線の場合では自己遮蔽効果というのですけれども、ガンマ線自身がデブリ自身により減衰していく効果の見積りが難しいということがあります。また、中性子についても減速材や吸収材が組成に含まれていると、減速や中性子の効果が厳密に分らなければ、測定したガンマ線や中性子のフラックスからデブリに含まれているウラン量を逆算することが難しいことになります。

そもそもガンマ線や中性子の発生量は、デブリに含まれています燃料の燃焼度に依存します。商用炉では異なる燃焼度の燃料を組み合わせで運転されており、デブリ中の燃料の燃焼度が分からなければそもそもガンマ線や中性子の発生量が分からないため、デブリ中のウラン量を推定するのが困難となります。

一方で、ミュオン散乱法では比較的重い元素、デブリの場合ですとウランに感度が高く、燃焼度の影響を受けずにウラン量を推定できる特徴があり、この性質を使ってデブリに含まれるウラン量を推定できるのではないかと考えています。

こちらはシミュレーション検討の結果をまとめたスライドで、解析方法としてはいろいろな方法があるのですけれども、ここでは機械学習を使った解析手法について紹介させていただきます。

機械学習を使う場合は、最初にデブリの中に含まれているウランを推定するアルゴリズムをトレーニングするというプロセスが必要になりますけれども、そのために私どもはMCNPというシミュレーションコードを使いまして、ユニット缶、デブリの収納容器の中にランダムにウランやジルコニウムやステンレス、水などを配置し、宇宙線ミュオンを飛ばしてミュオン散乱を測定し、その結果からデブリの量を推定するアルゴリズムをトレーニングいたしました。

トレーニングしたアルゴリズムを使いまして、また別途作りましたシミュレーション結果を解析させたのがこちらの図であります。横軸が新たにテスト用に作りましたシミュレーションのデブリに入っているウランの重量、縦軸はアルゴリズムが推定してきたウランの重量になります。従いまして、実際入っていた量と推定重量がイコールになる、つまり赤線の上に乗れば正解ということになります。一個一個の丸はいろいろな組成のデブリのそれぞれのケースに相当するのですけれども、こちらに示しておりますようにそれなりに良い推定精度

が得られていることがご理解いただけるかと思えます。

デブリ仕分けにつきましては、最近、装置開発もやっております、最新の情報につきましてはこちらの論文の方で紹介しております。

それ以外の原子力分野の応用方法としましては、ロスアラモスの研究成果になるのですが、乾式キャスクの中に入っております使用済燃料の測定で、保障措置に使う事例がございます。乾式キャスクの中に使用済燃料が保管されていますが、キャスクを開けて中を検証するのは放射線量が非常に高く困難でありまして、開けずに外から測定する手法があれば検認に使えます。ロスアラモスのチームではこのようにミュオン軌跡検出器で乾式キャスクを挟みまして、こちらはシミュレーション結果なのですが、確かに燃料が入っている部分と燃料の抜かれている部分がイメージングされています。

ここから先は人工ミュオンビームへの期待ということで、ちょっと新しいトピックについて紹介させていただければと思います。最初に上坂先生からもご紹介がありましたけれども、最近、人工的に作られたミュオンを加速することがちょっとしたブームになっておりまして、国内ではJ-PARCの方で超低速ミュオンというプロジェクトがあるのですが、加速器で発生させたミュオンを一度止めまして、その後でまたミュオン加速器に入れて再加速してやるというプロジェクトでございます。最終的には200 MeVやより高いエネルギーまで加速するという計画だと聞いておりますけれども、そうしますと色々なもののイメージングに使えます。例えば先ほどの乾式キャスクの場合ですと、宇宙線ミュオンを使った場合ですと宇宙線ミュオンが広いエネルギー広がりを持っていますのでもやっとした画像になりますが、人工ミュオン、加速ミュオンを使った場合ですとはっきりとした画像が得られますし、産業用にも応用できるのではないかと考えております。

また、海外の事例でありますけれども、近年、レーザー航跡場加速、いわゆるレーザー加速で電子を非常に高いエネルギーに加速できるようになっています。具体的にはGeV以上に加速することができるようになっておりまして、GeV以上に加速した電子をタンセンセンシングステンなどの標的にぶつけますと、ミュオン対生成といって高プラスとマイナスのミュオンを対生成することができます。

このように発生させたミュオンを使っていろいろなことに応用していこう、というプロジェクトがアメリカで動いております。DARPAの予算ですけれども、昨年度からローレンス・リバモア国立研究所と、ローレンス・バークレー国立研究所を中心とする二つのプロジェクトが動いております。リバモアのプロジェクト方は欧州ELIビームラインとの共同

でレーザー航跡場加速による電子加速と、発生させたミュオンの観測を進めておりまして、大型で強力なレーザーを使って電子を加速して、標的にぶつけてミュオンを発生させるアプローチをしております。

一方で国内に目を向けますと、同じような研究開発を大阪大学の細貝先生たちがやられておりまして、細貝先生はミュオン発生のため、とは言っていないのですが、僅か5センチのセルによるレーザー加速で1.3 GeVの電子加速に成功しております。実際にイメージングに使うにはもう少しエネルギーを上げたいところではあるのですが、僅か5センチでミュオン源ができるようになりますと、本当にもう世界が変わって、いろんな応用分野が開けてくるのではないかと期待しております。

こちらの図にはこれまで提案されたり、実用化されてきたミュオンイメージをプロットしているのですが、横軸はミュオン透過距離、縦軸が測定時間に相当します。例えばピラミッドや古墳、原子炉やコンテナスキャナなど、赤の点線の上のところは実用的にやられている領域なのですが、赤の点線の右下の領域はこれまで宇宙線ミュオンの強度が足りずに実用化されてこなかった領域でございます。

ところが、先ほどのような小型のミュオン源ができますと、この領域にも活用できて、人工ミュオン源による技術適用範囲を広げることができるのではないかと期待しております。

すみませんが、既に時間になっておりますので、まとめについては飛ばします。以上で発表を終わらせていただきます。ありがとうございました。

(上坂委員長) とても新しい技術の様々な応用、特に原子力への応用の話をしていただきました。

それでは、委員会の方から質問させていただきます。それでは、直井委員、よろしくお願いいたします。

(直井委員) どうも御説明ありがとうございました。

ミュオンイメージング技術で、今後いろんな分野で非破壊検査技術として適用を進められることを是非期待したいなと思いました。

まず、スライドの12ページ、13ページで、ロスアラモス研究所の技術を使った、いわゆるコンテナスキャナの説明がございました。これはとてもすばらしいなと思ったのですが、アメリカでは核セキュリティ上の課題として、分厚い遮蔽容器の中に隠匿された核物質をどうやって検知するかということが大きな課題になっていて、ボストンの港でかなり大きな装置を造って、エックス線を使った大規模な検査装置を造って試験をしていたという

のは知っていたんですけども、一方でこういうミュオンの検査装置も開発していたというのはちょっと驚きました。

それで、検査するために特に放射線源ですとか、検査装置、放射線発生装置も不要で、自然の放射線を使って検査ができるというのは画期的だなというふうに思いました。

それで、質問なんですけれども、空港などでスーツケースや手荷物をスキャンするエックス線のスキャナというのがあるわけですけども、これに例えばミュオンのスキャナを使用した場合に、エックス線のスキャナと競合できるようなコストで仕上がるのかというところ、感触でも結構なので教えていただければ。

(宮寺シニアマネジャー) コスト的には、もちろんサイズにもよるのですが、例えばコンテナスキャナに関して言いますと、港湾に導入されており、高エネルギーのエックス線を使ったものが港湾で利用されていると思うのですが、ミュオンコンテナスキャナはそれと同等か若干高いぐらいの価格感だと思います。

ただ、エックス線と大きく違うところというのは、エックス線は非常に高い分解能で、はっきり画像が見えるんです。それに対してミュオンの場合ですと、得られる画像はこちらにありますようにもやっとしている、その代わりに物質判別ができる、そういった特徴を持っていますので、相補的であるというふうに考えております。

また、空港に関して言いますと、非常に速いスピードで検査するということが求められまして、ミュオン散乱法では最低でも数分レベルの測定時間が必要ですので、そういったところは正直、エックス線の方がいいのではないかと思います。

ただ、コンテナスキャナみたいに相補的な運用ができれば一番いいと考えております。

(直井委員) ありがとうございます。

それから、20ページで、デブリを回収してきて、コンテナに入れたデブリを非破壊でこのミュオンスキャナを使って測定するというようなアイデアがあった、御説明がありましたけれども、このデブリ中の核物質測定は、これ一つのサンプルにどれぐらいの測定時間がかかりますか。

(宮寺シニアマネジャー) こちらは今、1時間を想定しています。

(直井委員) 1時間、結構時間掛かります。

(宮寺シニアマネジャー) そうですね。

(直井委員) はい、分かりました。

それから、14ページでこのミュオンイメージングでインフラの応用の例が紹介されてい

まして、今年の3月の定例会議だったんですけれども、高速道路の橋梁をエックス線を使って検査をするというお話を伺ったんですけれども、やはりエックス線の発生装置の出力で、例えば70センチだとか40センチを超えるようなコンクリートは検査が難しいというような話があって、これはミュオンを使うと結構できるんじゃないかなと思ったんですけれども、何かこういう橋梁の検査をやられているところ、専門の関係者の方にアプローチされたことってありますでしょうか。

(宮寺シニアマネジャー) ありがとうございます。

橋梁を測定するときの一つ難しいのが、今の検出器ってそれだけで重いんですよ。それを持ち上げるとなると結構な工事になっていまして、例えばロスアラモスの方では軽量のカーボンファイバーを使った検出器でイメージングを行うとか、そういった開発を行っておりました。鉄筋コンクリートを持ってきて測定することはできるんですけれども、実際現場に持っていくとなるとまだまだ開発段階というふうに考えています。

(直井委員) エックス線の発生装置も結構重いので、これも結構大変なんですけれども、でもただこれができるようになると、プレストレスト・コンクリートの充填の度合いだとか、断線しているとか、そういうのが判別できるかというところが、まだちょっとR&Dが必要かもしれませんけれども、非常に期待ができる検査装置、検査技術になるんじゃないかなと思いました。どうもありがとうございました。

(宮寺シニアマネジャー) ありがとうございます。

(直井委員) 私からは以上でございます。ありがとうございます。

(上坂委員長) 岡田委員、お願いします。

(岡田委員) 御説明ありがとうございました。

私の方からは基礎的なお話をちょっと関心があってお聞きしようと思うのですが、5ページのところですけれども、イオン化損失というのは結局透過率だから、先ほどおっしゃっていたように、火薬麻薬についても透過率で調べたということだと理解しました。

もう一つのクーロン多重散乱というのは非常に面白いと思って、クーロン場で曲がっていくと。そういうときに、先ほど鉄と鉛がありましたけれども、ウランと同じように鉄も区別できる。ただ、近いと難しいという意味で、このページ、5ページのところに物質の原子番号がおおよそ比例して分かるという言い方をされていたんですけれども、それは近いとやっぱり難しいということなのですか。

(宮寺シニアマネジャー) おっしゃるとおりです。

あと一つは、補足説明させていただきますと、麻薬の測定はイオンミュオン散乱法にミュオン透過率、そういったものを組み合わせてやっております。画像化する際には、ミュオンの散乱角を使って行っております。

それであと、原子番号が近いものの例なのですけれども、例えば金とタングステンの場合はタングステン10時間とか20時間くらいのオーダーでないと判別できなかったことがありました。

一方、原子炉の中ですと重い元素だとウラン、もちろん鉛などもありますけれども、今狙っているウランがメジャーですので、そういった意味では非常に判別がしやすい状況です。(岡田委員) 先ほどデブリの話をしていましたけれども、私、デブリについては想像すれば鉄とジルコニウムとウランというのがあるので、どちらかというとならば全体を見ようとしたら、ミュオンの検出器で十分見られるということなのですよ。

(宮寺シニアマネジャー) そうなんです。こちらの方は原子炉で使われています主な元素を示していますけれども、鉛ぐらいしかは生体遮蔽で使われておらず、重元素では本当にウランぐらいでして、あとは中間元素の鉄であったり、ガドリニウムであったり、ジルコニウムだったり、そして軽元素。こういったもので構成されておまして、重元素はほぼほぼウランです。先ほど申し上げましたけれども、ウラン測定には非常に適した手法であるというふうを考えております。

(岡田委員) 私はもともと分析屋で、中性子放射化分析をやっている身としては、分析する試料を採取して、それを分析する。そうすると、全体像が分からないので、しようがないからいろんなところから採取してきて、均一ですよとか、分布が分かりますよと言っているのですけれども、全体像としてのイメージングはなかなかできない、今回のミュオンのイメージングというのは、全体像が見えるということは私はすごくいいなと思いました。

それで、もう一つ私、今、お話を聞いて、一つ聞き逃さないようにと思ったのですけれども、18ページのところで、今、宮寺さんが若い人が優秀だったというところを私は聞き逃さないで、これは絶対聴きたいと思ったのですけれども、この技術には、優秀な人たちが関わっているというのは分かりましたけれども、優秀な人たちとかの若い人にさらに広げるためには、IRIDはどういうふうになっているか、また、一般の人たちに分かりやすく、そして若い人に分かるような何か発信をどんどんしていくといいなと思ったのですけれども、どうでしょうか。

(山内理事長) はい。一応、IRIDとしてもホームページでいろんなこういった色々とこの

ような研究開発した成果も含めて公開するとともに、年に1回、シンポジウムを開催し、発表をしています。そのシンポジウムの中で、是非大学等の若い人たちに発表の機会を与えて、優秀な発表を行った方を表彰するとか、そういう人材育成の面でも一応力を入れてはやってきていますので。ただ、特定の技術だけに着目して何かアピールするというのは、いろいろ多くのメーカーさん、傘下にいますが参画しているので、そこは公平にやっているというのが実態でございます。

(岡田委員) できれば中高生とか、そういう子たちに何か分かりやすく、この原子力の夢、それからこういうデブリとか処理についてもすごく夢のある技術があるのだというのをもう少しできるといいですね。私も協力したいと思いますので、是非やっていきたいと思います。

(山内理事長) ありがとうございます。一緒に是非頑張りたいと思います。

(宮寺シニアマネジャー) 一昔前にミュオンの話を聞いた福島出身の若者が、私のグループに是非一緒にやりたいと入ってきました、本当に熱い思いで頑張ってくれています。

(岡田委員) ありがとうございます。よろしく願いいたします。

以上です。

(上坂委員長) 上坂の方から幾つか質問させていただきます。

まず、9ページとか11ページに検出器がありますが、この高感度化ということが重要かと思えます。これによって測定時間が短縮されまして、利用が更に進むと思うのですよね。

それから、先ほど来お話があった世界の核セキュリティの研究開発では、中性子検出器が従来高価なヘリウム3ガス検出式しかなかったのですけれども、それに対抗すべき固体型の検出器の開発が行われたのですよね。

また、エックス線に関しても、フラットパネル検出器がここまで医療用の40から70 keVに最高感度がある0.4ミリ厚のGOSシンチレータ型が一般的なのです。非破壊検査用には数百keV用の1.5ミリ厚のGOSシンチレータ型が開発中と。これは昨年2月14日のこの原子力委員会の定例会議にて、東大の高橋浩之先生から報告を受けました。

そういうことで、今こういうガス管型なのですけれども、今後難しいでしょうけれども、ソリッドステートの検出器の開発の可能性はいかがでしょうか。

(宮寺シニアマネジャー) 例えばなんですけれども、高橋先生のフラットパネルみたいな検出器でミュオンが検出できるようになりますと。本当に薄くて、軽くて、例えば先ほど紹介させていただいたインフラ検査だったりとか、応用範囲が広がるんじゃないかなと考えています。

(上坂委員長) そうですね。コンプトンカメラなども角度を測るわけで。幾つかセンサを使ってね。ですので、今回、多重散乱の効率的測定の可能性もあるかと思うので、是非そちらの方も今後視野に入れていただければと思います。

また、22ページの右側の方に、ウランの測定重量のデータがあるのですが、これはシミュレーションでしたか。

(宮寺シニアマネジャー) こちらはシミュレーション結果です。

(上坂委員長) 今後、福島では現在2号機での燃料デブリの試験取り出しが行われて、その後、1、3号炉も含めた本格的な取り出しが計画されていると。これは取り出し方法に応じて取り出すデブリの大きさ、それから収納缶。これらが変わってくると思います。

もし、今、現状想定されている一番小さい収納缶ですと、直径が30センチぐらい、厚さが8ミリ程度のステンレスで、高さ40センチぐらいですかね。これぐらいの小型の収納缶にデブリを入れて収納していくと。そうしますと、これぐらいの大きさになると、中のウランの含有量は、キログラムよりはもっと少ないグラムオーダーになってくると思うのですよね。

このシミュレーション結果ですけれども、22ページを見ますと、大体キログラム単位、最小が50キログラム程度。これがグラムのオーダーになるとどうなのかなと思います。というのは、もし充填剤を入れて、非常に大きな燃料デブリを大きな収納缶に入れる場合ですと、きっとキログラムくらいあるかもしれませんね。そうするとこれ使えるかなと思うのですけどね。小型のものだと、含有量がグラムぐらいたとどうなのかなと思ひまして、質問させていただきます。

(宮寺シニアマネジャー) お答えしにくいところなのですけれども、ミュオンで全てできるわけではなくて、例えば小さいデブリに対しては比較的自己遮蔽だったり減速の効果が少ないので、例えばガンマ線測定であったり、中性子測定が有効になるかと思ひます。ミュオンはもうちょっと大きい量のものを測定することをどちらかというターゲットにしていまして、今現在そういう開発を行っております。

(上坂委員長) そうですね。そうすると、大きな収納缶の場合だと可能性が出てきますよね。

(宮寺シニアマネジャー) もう一つメリットを言いますと、デブリはそれなりに線量を持っていますので、デブリを遮蔽しないといけないのですけれども、ミュオンの場合ですと、例えばコンクリートとか、そういった遮蔽体越しに測定することができますので、つまり検出器にガンマ線の影響を与えないぐらい遮蔽した状態でデブリ中のウラン量を推定することがで

きますので、それが一つのメリットだと考えております。

(上坂委員長) それから、燃料デブリの中身は、さっきもお話がありましたけれども、原子番号92辺りのウランと同位体と、それから原子番号26の鉄、それから40のジルコニウムの金属系、それから更に軽いコンクリート系に大別されます。しかしながら、これらが溶融しているのですね。

ということで、エックス線CTの場合、元素のエックス線減弱係数の相対値であるCT値という指標を使って測定するのです。これは原子番号と相関があります。したがって、溶融物の単位体積当たりの平均的原子番号の分布が、つまりその等高線図で得られるということです。

そこで、それまでの検出測定値や分析や考察から、きっと機械学習も使いながら、あるCT値以上の領域はウランありとみなして、そしてCT値から溶融ウランの濃度を推定し、そしてそのウランの含有量を推算していくのではないかと思うのですね。今日も等高線がありましたね。混合物だったら平均的な原子番号で、これ以上であればウランが入っているだろうと。何%かね。そういうのをまさに試験取り出しで分析して、大体の目算付けてやっていくのが現実的かなと思うのです。ミュオンの場合はどうでしょうか。ウラン量の推定というのは、混合物に関してはいかがでしょうか。

(宮寺シニアマネジャー) いろんなケースを社内でも検討しているのですが、幾つか特長が分かってきました。メインの成分が例えば水とか鉄とかウランとかそういった場合ですと比較的当てやすい、推定しやすいと言えます。ところが、物すごくたくさんの成分が混じっている場合となってくると難しくなってきますし、特に重元素、重い元素がたくさん分布している場合ですとやっぱり難しくなってきます。今回の場合ですと、幸い重元素に関してはウラン以外にプルトニウム、プルトニウムとウランは判別はできないのですけれども、そこは核物質という観点では区別できなくてもいいと考えています。

(上坂委員長) そうですね。そうするとかなり選択性のいい測定になるわけですね。

(宮寺シニアマネジャー) はい。

(上坂委員長) はい、分かりました。

それから、27ページに、既に行われている、あるいは今後行われるであろう測定対象の図があります。ここに、縦軸に測定時間があるのでいいと思いますが、あと対象物の大きさ、それから空間分解能ですね。現状計れる空間分解能。これも図に入れていただくと、ユーザーの方が見て、これ使えるとすぐ分かるのではないかと思うのです。是非それも入れていた

だいた方が非常に応用が広がるのではないかと私は思います。この次のケースでは是非対象物の大きさと空間分解能。それらも入れていただければと思います。

また、今後の展開のところ、レーザー加速を使ったミュオンの発生の話がありまして、26ページです。一番最後にある大阪大学の装置は私も見に行ったことがあります。レーザーはこの部屋の4分の1ぐらいです。非常にコンパクトで高エネルギー電子が出る。本当にこの部屋の4分の1ぐらいの装置でミュオンが出せるのですよね。非常にポータブルといえますか、移動させて測るということが可能になってくるかなと思います。是非これも進めていただければと思います。

また、次にIRIDの山内理事長にもお伺いしたいのです。私が東大にいたときに、約20年ぐらい前ですけれども、文科省のJSTの安心安全の研究開発プロジェクトに加わって、手荷物検査、手荷物中の隠蔽核物質の検出システムの開発を、JAEAと東大とメーカーでやったのですよ。それで、JAEAはアクティブ中性子法で、東大が二色エックス線物質識別法で、それで企業がパッシブガンマ測定法でやりました。それでベルトコンベヤーで試験体を動かして3つのうちどこかで引っ掛かればもう危ないというので、アラームを出すというシステムを作ったのですね。

それで、IRIDの今年の10月の成果報告書を見ますと、燃料デブリの成分分析について幾つかの候補が上がっていました。それぞれの手法のメリット、デメリット、それからどの手法を採用していくのかと。今後の方針についてお考えを御教示いただければと思います。(山内理事長) 今後の方針、決まっているわけではありません。ただどの方法にも一長一短があって、必ずしも一つの方法でデブリの評価かが100%できるというのはなかなか難しいと思いますので、やはりこれらのこの組合せを考えながら、複数の方法を使ってその結果で最終的に相互判断していくというのがやはり一番現実的ではないかというふうには考えるところです。

(上坂委員長) 分かりました。

IRIDの報告書では、燃料デブリの成分分析が中性子と、エックス線CT、それから今日説明いただきましたミュオン、それからパッシブガンマ中性子ですね。これの四つの方法がありまして、私も先ほどの研究の経験から、測定対象の成分を正確に見落としなく分析するには、複数の異なる手法で測って、確認しながら評価はされていくと思っているのですね。中性子は正確にウランを識別できるのですけれども、遮蔽体に囲まれちゃったりとか、それからベリリウムとか、吸収体に囲まれちゃうと測れない。一方、エックス線はそういう軽

いものはよく見えるけれども、鉄や重い金属で囲われちゃうと見えない。まさにそういう一長一短が出ました。今日のミュオンもそういう用途がありましたから、是非そういう組合せでやっていただきたいなど、私の経験からそう感じております。

その中で、ミュオン測定は非常に重要な、今日御説明があったような重要な一角を担うと私は思います。これから燃料デブリの試験取り出し、それから本格取り出しが行われて、成分分析が進められます。もう実機を想定して、もうすぐ始まるのだというような緊張感を持って研究開発を行っていただきたいと強く期待するところでございます。よろしく申し上げます。

ほかに委員の方々、質問ないですか。

それでは、説明どうもありがとうございました。

(山内理事長) ありがとうございました。

(上坂委員長) それで、議題(1)が終わりますので、では議題(2)について事務局から説明をお願いします。

(梅北参事官) ちょっと今、規制庁さんを待っています。

(原子力規制庁事務局) 原子力規制庁事務局でございます。こちらの音声聞こえておりますでしょうか。

(梅北参事官) 大丈夫です。それではよろしくお願いいたします。まずは事務局から説明をさせていただきます。

二つ目の議題ということですがけれども、東北電力女川原子力発電所2号炉の発電用原子炉の設置変更許可(所内常設直流電源設備(3系統目)の設置等)について(諮問)でございます。

5月8日付で原子力規制委員会から原子力委員会に諮問がございました。これは原子力規制委員会が発電用原子炉設置許可、設置変更許可を行うに当たり、原子炉等規制法第43条3の6第3項の規定に基づき、発電用原子炉が平和の目的以外に利用されるおそれがないことの基準の適用について、原子力委員会の意見を聞かなければならないこととされていることによるものです。本日は原子力規制庁から説明を聴取し、委員会の方で議論を行った上で、次回以降、答申を行う予定です。

それでは、原子力規制庁、原子力規制部審査グループ実用炉審査部門安全管理調査官、天野さんから御説明いただきます。本日は天野調査官にはオンラインで御参加いただいております。よろしくお願いいたします。

(天野安全管理調査官) 原子力規制庁実用炉審査部門の天野と申します。本日はよろしくお願
いいたします。

ただいま御紹介いただきましたとおり、本件は東北電力株式会社女川原子力発電所2号炉
の発電用原子炉設置変更許可に関する意見の聴取について御説明させていただくものでござ
います。資料は、資料の第2-1号、資料の第2-2号、それと参考資料第2号の三つの資
料に基づいて御説明をさせていただきます。

まず、資料の第2-1号をお願いいたします。本件は、令和5年7月4日付で東北電力株
式会社から原子炉等規制法の規定に基づき設置変更許可申請があったものですが、原子力規
制委員会として審査した結果、許可の基準の各号のいずれにも適合していると認められまし
たので、原子炉等規制法第43条の3の6第3項の規定に基づき、別紙のとおり同条第1項
1号に規定する基準の適用について御意見を伺うものでございます。

別紙の御説明の前に、資料第2-2号の申請の概要の方で申請の概要について簡単に御説
明させていただきます。

裏面をお願いいたします。

(3) 変更の内容でございます。

女川原子力発電所について、これまでに設置変更許可等を受けた申請書の記載事項のうち、
今回の変更は本文5号、8号及び10号の記述の一部を変更するものでございます。

なお、本文8号の使用済燃料の処分の方法の変更ですが、これは後ほど(4)で御説明いた
しますが、法律改正に伴う組織名称等の形式的な変更になります。

続いて、具体的な変更内容について、(4)の変更の理由に記載しておりますが、①から
③まで三つございます。

まず、①ですが、2号炉に所内常設直流電源設備(3系統目)、いわゆる第3電源を設置
するのが1点目でございます。

②ですが、2号炉に設置されている固体廃棄物処理系の固化装置の固化材をプラスチック
固化からセメント固化に変更することとして、プラスチック固化式固化装置を撤去し、これ
に伴い、1号炉との共用の取りやめなどを行った上で、セメント固化式固化装置を新たに設
置するというのが2点目でございます。

③ですが、再処理法の法律改正により、法律の名称や関係組織の名称等が変わったこと
に伴い、記載の適正化を行うという形式的な変更になります。

続いて、審査の結果の主なポイントについて、参考資料第2号を用いて御説明をさせてい

たきます。

まず、右下 1 ページの第 3 電源について御説明をいたします。

第 3 電源の設置目的、機能ですけれども、上の枠内にありますとおり、更なる信頼性を向上するために、設計基準事故対処設備の電源が喪失した場合に、重大事故等の対応に必要な設備に直流電力を供給するため、特に高い信頼性を有する 3 系統目の直流電源設備として、第 3 電源用の蓄電池を原子炉建屋付属棟に設置するものになります。

下の図を見ていただきますと、既に許可されているものとして、黄色の網掛けのある SA 1 系統目、それから水色の網掛けのある SA 2 系統目がありますけれども、本件申請ではこれらに加えまして、赤色で囲っている SA 3 系統目を設置するものになります。

第 3 電源の設置場所ですが、右の図にありますとおり、既に許可を行った原子炉建屋付属棟の中に設置するというごさいます。

この第 3 電源に係る設置変更許可については、これまで 9 例の審査実績があり、今回で 10 例目ということになります。技術的な内容については、先行審査実績と比べて大きく変わるころはなく、審査の結果としては一番下に記載しておりますが、3 系統目の直流電源設備について、既存の電源設備に対して異なる建屋又は区画に整備すること、異なる電路で接続すること、24 時間の電力の供給が可能な設計とし、必要な手順を整備することなどを確認しております。

続いて、右下、2 ページをお願いいたします。

二つ目の変更内容である廃棄物処理系の固化装置の固化材の変更等について御説明をいたします。

左が変更前で右が変更後ですが、現在、左側の変更前のようにプラスチック固化式固化装置が設置されておりますが、これを撤去した上で、右側の変更後のようにセメント固化式の固化装置に変更するというものでございます。こちらについても、先行の審査実績と大きく異なるころはなく、審査の結果としては一番下に記載しておりますが、液体状の放射性廃棄物を処理する施設ということで、液体状の放射性廃棄物が漏えいすることを防止する設計とすること、また固体状の放射性廃棄物を処理する過程において、放射性物質が散逸し難い設計とすることなどを確認しております。

主な審査結果については以上でございます。

続いて、資料第 2 - 1 号に戻っていただきまして、裏面の別紙をお願いいたします。

一番下の方に、本申請についてはと記載している箇所がございますけれども、まず 1 番目

のポツですが、原子炉の使用の目的については商業発電用という目的を変更するものではないこと、それから、2ポツ、3ポツ、4ポツですが、こちらは使用済燃料の取扱いについてですが、まず2ポツ目ですけれども、使用済燃料については再処理法に基づく指定を受けた国内再処理事業者において再処理を行うことを原則とし、再処理されるまでの間、適切に貯蔵・管理するという方針に変更はないこととしております。

なお、ここに出てくる法律名称や機構の名称について、先ほど変更の理由で御説明しましたが、再処理法の改正に伴い形式的な変更がなされているものですが、実質的な内容についての変更はございません。

続いて、3ポツ目ですけれども、海外において再処理が行われる場合には、我が国が原子力の平和利用に関する協力のための協定を締結している国の再処理事業者において実施すること、海外再処理によって得られるプルトニウムは国内に持ち帰ること、また再処理によって得られるプルトニウムを海外に移転しようとするときは政府の承認を受けるという方針に変更はないこと。そして、上記以外の取扱いを必要とする使用済燃料が生じた場合には、これまでに許可を受けた記載を適用するという方針に変更はないこと。

以上のことから、発電用原子炉が平和の目的以外に利用されるおそれがないものと認められるとしてございます。

御説明は以上でございます。よろしくお願ひいたします。

(上坂委員長) 天野さん、御丁寧な説明ありがとうございます。

それでは、原子力委員会から質問させていただきます。

それでは、直井委員からお願いします。

(直井委員) 御説明ありがとうございます。

申請の概要の説明の資料で、この3番目の3系統目のこの電源設備は、原子炉建屋付属棟の①、②、③で示したエリアに設定をするというお話だったんですけれども、このエリアというのは以前は何が置かれていた部屋で、若しくは何もない部屋だったのかという点をちょっと教えていただけますでしょうか。お願いします。

(天野安全管理調査官) 原子力規制庁実用炉審査部門の天野でございます。

参考資料第2号の1ページ目でございます、右上でございます①、②、③の箇所に、ここに今回新たにいわゆる第3電源を設置するんですけれども、ここに以前、何が設置されていたかという御質問と理解いたしました。

ここについては、次の2ページでございます左側のプラスチック固化式固化装置、これが

設置されていましたが、今回、御説明させていただいたように、この左側のプラスチック固化式固化装置を撤去いたしまして、セメント固化式固化装置を設置するんですけども、その空いたスペースに1ページにある第3電源の設備を設置するというものでございます。

以上でございます。

(直井委員) どうもありがとうございます。

それから、資料の第2-2号の2ページ目のところで、(4)で変更の理由というのがございますけれども、②でろ過脱塩装置から発生するこの使用済樹脂と廃スラッジの固化処理を取りやめるというふうな変更がありましたけれども、この取りやめる理由は何でしょうか。教えていただけたらと思います。よろしく願いいたします。

(天野安全管理調査官) 原子力規制庁の天野です。こちらについては、今回変更する理由については、事業者から聞いていますのは、今回対象となる使用済粉末樹脂等については、現在、中深度処分の対象廃棄物として処理する方針を事業者の方で検討しておりまして、このため、今回のプラスチック固化式固化装置の撤去に併せて、この浄化系沈降分離槽のタンクに貯蔵をするという方針にするという説明を受けております。

変更の理由については以上でございますけれども、この浄化系沈降分離槽については十分な貯蔵容量があるということで、この変更を行っても安全性に問題はないということを確認してございます。

以上でございます。

(直井委員) どうもありがとうございました。私からは以上です。

(上坂委員長) 岡田委員、お願いします。

(岡田委員) 天野様、御説明ありがとうございます。

私の方は、知識不足というか、分からないところがあるのですが、このプラスチック固化式固化装置というのはなぜ使われなくなったのかということをお聞きしたいんですけども。普通一般、セメントと私は理解をしているのですが、固化体がプラスチックというのはなぜ使われなくなったのかを教えてくださいたいのですが。

(天野安全管理調査官) 原子力規制庁の天野です。

恐れ入ります。ちょっと音声途切れたので、質問をこのように理解したということで回答をさせていただきますが、今回プラスチック固化式固化装置をなぜ使わないことにして、セメント固化式固化装置に変更したのかというふうに理解しましたが、そのような理

解でよろしいでしょうか。

(岡田委員) はい、そのとおりです。よろしく申し上げます。

(天野安全管理調査官) こちらも事業者の説明によれば、現在、プラスチック固化式固化装置というのは事業者で使っていないんですけれども、これがプラスチックが可燃物であるということで、今回、新基準の適合性審査ではこの設備を休止設備にしているということになっております。今回新たにこのセメント固化式固化装置に変更いたしまして、固化処理ができるようにしたということで説明を聞いております。

以上でございます。

(岡田委員) ありがとうございます。

可燃物であるか不燃物であるかというところかもしれないですね。理解しました。ありがとうございます。

(上坂委員長) それでは、上坂の方から質問させていただきます。

まず、(参考)本申請の概要の1ページ目で、(1)の所内常設直流電源設備(3系統目)の設置、それから裏の(2)固体廃棄物処理系固化装置の固化材変更等、これは現在この女川2号は新規制新基準との適合を合格して、今年中に再稼働の可能性ということがあります。その審査と今回のこの2件追加の件、その関係を教えてください。

(天野安全管理調査官) 原子力規制庁、実用炉審査部門の天野でございます。

今、上坂委員長から御指摘いただきましたように、いわゆる再稼働とおっしゃいましたけれども、原子炉施設を利用するための基準適合性として、新規制基準ではまず福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえたいわゆるデザインベースと、シビアアクシデントの対策を盛り込んだ新規制基準の適合性審査の適合性を確認いたしまして、それで再稼働するということになっております。

一方、今回この参考資料第2号の右下1ページの枠内にありますとおり、今回の3系統目というのは、このシビアアクシデント対策まで講じた上での更なる信頼性を講じるための設備ということで、経過措置としては設計及び工事計画認可から5年の経過措置が規定されております。したがって、事業者が対応する、いわゆる再稼働のための対応とは別に、事業者がこの経過措置の範囲内において必要な許認可手続等を行っていくということで、今回はその一環としての設置変更許可申請ということになります。

以上でございます。

(上坂委員長) どうもありがとうございます。よく分かりました。

それでは、委員の方々、追加質問ございませんか。

(岡田委員) ございません。

(上坂委員長) それでは、本件、資料第2-1号の裏面にあります別紙の後半にある本申請について、発電用原子炉が平和の目的以外に利用されるおそれがないかどうか、これは原子力委員会の方で審査させていただいて、また答申させていただきたいと存じます。

それでは、御説明どうもありがとうございました。

(天野安全管理調査官) 原子力規制庁の天野です。

よろしくお願いいたします。本日はありがとうございました。

(上坂委員長) それでは、議題(2)は以上でございます。

それでは、議題(3)について事務局から説明をお願いいたします。

(梅北参事官) 三つ目の議題ですけれども、関西電力高浜原子炉1号炉、2号炉、3号炉、4号炉の発電用原子炉の設置変更許可(3号炉及び4号炉の蒸気発生器の取替え等)について(諮問)でございます。

本件については、5月15日付で規制委員会から原子力委員会に諮問がございました。これも先ほどの議題と同じで、原子炉等規制法規定に基づいて発電用の原子炉が平和の目的以外に利用されるおそれがないということについて、原子力委員会の意見を聞くことによるものでございます。本日これも同じように規制庁から説明を聴取して、委員会において議論を行った上で、次回以降答申を行うという予定になっております。

それでは、規制庁の原子力規制審査グループ実用炉審査部門安全規制調整官、奥様から御説明いただきます。奥様につきましては、オンラインで本日は御参加いただいております。では、御説明よろしくお願いいたします。

(奥安全規制調整官) こちらは、原子力規制庁実用炉審査部門の奥でございます。よろしくお願ひします。

それでは、資料3-1、3-2、参考資料3に基づいて説明をいたします。

まず、資料の3-1ですけれども、本件は2023年4月25日付で関西電力株式会社から高浜発電所1号から4号炉の設置変更許可について、原子炉等規制法の規定に基づき申請があったものですけれども、審査を行いました結果、許可の基準の各号のいずれにも適合していると認められましたので、原子炉等規制法第43条の3の6第1項第1号に規定する基準、発電用原子炉が平和の目的以外に利用されるおそれがないことの適合について、原子力委員会の御意見を伺うものになります。

資料、変わりました、資料 3-2 を御覧いただければと思います。こちらによりまして本件申請の概要を説明させていただきます。

裏面、2 ページを御覧いただければと思います。

(1) と (2) につきましては、説明を割愛いたします。

(3) が変更の内容になっております。高浜発電所は昭和 44 年に設置許可を受けましてから、これまで何度か設置変更許可を受けておりますが、今回の変更は申請書の記載事項のうち、本文五号、八号、九号、及び十号を変更するものとなっております。

(4) は変更の理由になります。

一つ目、①は 3 号炉及び 4 号炉の蒸気発生器の取替えに伴い、蒸気発生器に係る記載を変更するもの。

二つ目、②は取り外した蒸気発生器等を保管するため、3 号炉及び 4 号炉共用の蒸気発生器保管庫を設置するとともに、1 から 4 号炉共用の外部遮蔽壁保管庫の保管対象物を変更するもの。

三つ目、③は 1 から 4 号炉共用の保修点検建屋を設置するもの。

四つ目、④は改正再処理法の施行により、法律名称等の記載の適正化を行うものとなっております。

続きまして、別の資料になりますが、参考資料 3 を御覧いただければと思います。

こちらの資料をもちまして、本申請の概要を説明させていただきます。

本申請による変更の内容、大きく分けて 3 点ございます。

変更の 1 点目、(1) は 3 号炉及び 4 号炉の蒸気発生器の取替えになります。

PWR におきまして、1 次冷却系側で発生した熱を 2 次冷却系に伝達するために設けられる熱交換器で、タービン発電機に係る蒸気を発生させる役割がある蒸気発生器、こちらを最新設計のものに取り替えるというものになります。

続いて、この資料の一番最後のページ、4 ページ目を御覧いただければと思います。ありがとうございます。

こちらの上の方を御覧いただければと思いますが、変更の 2 点目、(2) は取り外した旧蒸気発生器及び工事廃材を保管するため、新たに蒸気発生器保管庫の設置等を行うものになります。

3 点目、(3) は点検等の作業エリアを確保するために、新たに保修点検建屋の設置を行うものとなっております。

この資料の 1 ページ目に戻っていただければと思います。ありがとうございます。

こちらはまず 1 点目の変更点、(1) ですが、高浜発電所においてこれまでに蒸気発生器伝熱管の応力腐食割れですとか、外面減肉が発生したことを踏まえまして、それらの対策のために、中段右側の図 1 にあります現行の 5 1 F 型から、主な改良点として説明します。伝熱管材料の改良など、個別の要素としてはそれぞれ前例があるものの、組合せとしては最新の設計になる蒸気発生器 5 4 F II 型に取替えを行うものになります。

応力腐食割れにつきましては、主な改良点の①にあります伝熱管材料の改良により対策を行うとしています。

また、外面減肉、こちらは 2 次冷却系に含まれる鉄分が蒸気発生器の伝熱管外面に蓄積をし、起動停止時の伝熱管の伸縮により剥離をしたスケールにより生じるものですが、スケールの発生を抑制するための水質管理は取替え前と同様に行いつつ、蒸気発生器を取り替えることで内部に残存したスケールを一掃するとしております。

主な改良点、4 点ございます。

一つ目、①番は伝熱管材料の改良になります。これは、応力腐食割れの対策として行うものでありまして、伝熱管の材料を現行の T T 6 0 0 合金から、応力腐食割れの耐性に優れた T T 6 9 0 合金に改良をいたします。これによりまして、伝熱管の熱伝導率が減少しますため、伝熱管の長さを延長し、伝熱面積を増加させることによりまして、伝熱管の伝熱性能を取替え前と同等にいたします。こうした寸法の変更によりまして、事故時の影響解析の条件に若干の変更が生じることになります。

二つ目の改良点②は、振止め金具の改良になります。蒸気発生器内は、気体、液体が激しく流動している状態になりますことから、伝熱管が流体振動により損傷することを防止するために、図 2 にありますように、伝熱管の逆 U 字部分に設置をされている振止め金具を従来の 2 本組みから 3 本組みに変更しまして、伝熱管の支持状態を改善するとしております。

三つ目の改良点、③番は、給水内管へのスプレイチューブの採用になります。給水内管から 2 次側器内での給水口には、図 3 の左側にあります J チューブを採用してはいたしましたが、異物持込みの低減を図るため、図 3、右側の上が閉じており、側面に小さな穴が多数空いているスプレイチューブ、こちらを採用するとしております。

四つ目の改良点、④は、小型気水分離器・改良型湿分分離器の採用になります。これは安全性の向上というよりは、主蒸気管やタービンの信頼性向上を図るために行うものでありまして、これらの採用により蒸気発生器から発生する蒸気中の湿分を低減するとしております。

これらの改良点は、それぞれ他のプラントで採用実績があるものになります。

主な審査結果ですけれども、これらの改良点を踏まえまして、各種の解析・評価への影響ですとか、流体振動による損傷防止等に係る設計方針について審査を行い、設置許可基準規則に定めた基準に適合するものと判断しております。

次のページ、2ページ目、3ページ目なんですけれども、これらにつきましては蒸気発生器の取替えに伴う事故等に対する解析・評価の影響を記載してございます。

蒸気発生器の取替えによる仕様変更によりまして、解析・評価において考慮すべきデータに一部変更が生じるんですけれども、事故時を想定した解析・評価の結果、事故による影響が基準を上回ることはなく、既に許可をした設計方針を変更する必要はないということを確認しております。

蒸気発生器の取替えについては以上になります。

続いて、4ページ目を御覧いただければと思います。ありがとうございます。

まず、左側になります。本申請による変更の2点目、蒸気発生器保管庫の設置等になります。取り外しました旧蒸気発生器ですとか工事廃材を保管するため、3号、4号共用の蒸気発生器保管庫を新設いたします。旧蒸気発生器には1次系の水が通りますため、線源管理の設計方針が適切であるか審査を行いました。

続いて右側、変更の3点目、点検建屋の設置になります。従来は燃料取扱建屋で1次冷却材ポンプの点検等を行ってございましたけれども、新規制基準対応のために追加設置をされた設備により作業エリアが狭くなってしまいましたので、新たに作業スペースを確保するため、1号炉から4号炉共用の点検建屋を設置するとしています。

図6の方に上から2階の平面図、1階の平面図、地階の平面図とあります。作業エリアは緑枠の部分になりますけれども、地階の赤枠の部屋として廃液処理室があります。点検等で洗浄を行った際に液体の廃棄物が生じますので、放射性廃棄物管理に関わる設計方針が適切であるかどうか審査を行いました。これらの建屋は図7にありますとおり、いずれも高浜発電所敷地内の山の手の土地を整地することによって建設されます。

主な審査結果ですけれども、これらの建屋の新設について、設置許可基準規則に定めた基準をいずれも満たすということを確認してございます。

本申請の概要説明は以上となります。

続きまして、資料3-1に変わります。3-1の2ページ目、別紙を御覧いただければと思います。

こちらを使いまして、平和基準目的への適合について説明したいと思います。

この適合については4月10日までに行いました関西電力のヒアリングにおいて確認をしております。

別紙の一つ目の項目、使用の目的を変更するものではないことにつきましては、商業用発電に使用する目的で基底負荷用として設置の許可を受けて以降、商業発電用として使用するものであること。今回の変更は原子炉の使用目的、また型式を変更するものでなく、変更後においても原子炉を平和の目的以外に使用するものではないこと、今回の変更は低濃縮ウランの使用、年間使用量の見込み、取替え燃料集合体、平均燃焼度を変更するものではなく、使用される核燃料物質は全て国際規制物資として規制対象となっており、平和の目的以外の用途に転用するものではないこと、また平和目的以外に転用することがないよう、核物質防護規定に基づき、特定核燃料物質の盗取等による不法な移転及び妨害破壊行為の防止を図っていることを確認しました。

二つ目の項目、再処理されるまでの間、適切に貯蔵・保管することにつきましては、使用済燃料は使用済燃料再処理・廃炉推進機構から受託をした原子炉等規制法に基づく指定を受けた国内再処理事業者において再処理を行うことを原則とし、再処理されるまでの間、使用済燃料を適切に貯蔵・管理するとしていることを確認しました。

三つ目の項目、海外で再処理が行われる場合につきましては、我が国と協力協定を締結している国の再処理事業者においてのみ実施をすること。また、海外再処理において得られるプルトニウムを国内に持ち帰ることとしており、海外へ移転しようとするときには政府の承認を受けるとしていることを確認しました。

四つ目の項目、上記以外の取扱いを必要とする使用済燃料が生じた場合、許可の方針を適用することに変更がないことにつきましては、こちらの言葉どおり、使用済燃料を平和の目的以外に使用することはないことを確認しています。

以上、確認しましたことから、発電用原子炉は平和の目的以外に利用されるおそれがないものと考えております。

説明は以上となります。

(上坂委員長) 奥様、丁寧な御説明ありがとうございました。

それでは、原子力委員会から質問させていただきます。

それでは、直井委員からお願いします。

(直井委員) どうも御説明ありがとうございました。

取り替える蒸気発生器ですけれども、ちょっと聞き逃したかもしれないんですけれども、これは今回、高浜3、4で取り替える以前に、どこか違う発電所ではもう既に取替え実績のあるSGだということでもよろしかったでしょうか。

(奥安全規制調整官) 御質問を頂いた内容については、これまで蒸気発生器の取替えの実績があるかどうかということであると理解いたしました。

お答えといたしましては、これまでに13のプラントにおいて蒸気発生器の取替えの実績というのはあるというのがお答えになります。

(直井委員) この同じ54FのII型に交換しているということでもよろしかったですか。

(奥安全規制調整官) はい。54FのII型を適用するのは今回が初になります。この前に蒸気発生器の取替えは行われているんですけれども、54F型ですとか、組合せとしては今回最新設計になりますけれども、これまでに別のものにこのような取替えが行われてきているというのがお答えになります。

(直井委員) どうもありがとうございます。

それから、この安全評価の中で、気象条件を変更して、この解析評価に影響が生じるという説明がございましたが、このメタデータ気象条件の変更というのは、気象データの更新をしたということなんでしょうか。

(奥安全規制調整官) はい。原子力規制庁の奥でございます。

御理解のとおりでありまして、気象条件、従前は2006年度時点の気象データを使っておったんですけれども、毎年関西電力が気象データを確認していく中において、直近の観測において、過去10年間の観測の中で気象データとしての代表性を有する、もはや2006年のデータは代表性を有さないということが確認できましたので、今回の申請におきましては、2019年の気象データの方に更新変更を行うということになっております。

(直井委員) どうもありがとうございました。私からは以上です。

(上坂委員長) では、岡田委員、お願いいたします。

(岡田委員) 御説明ありがとうございました。

私の方からは、参考資料の方です。本申請の内容の参考の(1)のところの高浜発電所においてこれまでに発生している蒸気発生器伝熱管の応力腐食割れ、それからSCC事例、外面減肉事例と書いてありますけれども、こういうことはどのぐらいの頻度で起きるものなのでしょうか。

(奥安全規制調整官) 原子力規制庁の奥でございます。

関西電力におきましては、毎回定期検査ごとにこういった応力腐食割れですとか、外面減肉が発生していないかどうかというのを、渦電流探傷試験という検査によりまして、全ての伝熱管において確認をしてございます。その結果、毎定検ごとに、本数には若干ばらつきがありますけれども、いずれか外面減肉か、あるいは応力腐食割れというのは確認がされてきているというのが実情でございます。

(岡田委員) 確認すると、これが確認されれば交換をするということになるのですか、

(奥安全規制調整官) 原子力規制庁の奥でございます。

こういった応力腐食割れ等が確認された場合に対応ということですが、基本的には一定以上の外面減肉等確認された場合には、伝熱管を施栓という機械式の栓で閉じてしまって、使わないようにするというふうな対応が一般的には行われます。

ということでこれまで対応してきたんですけれども、今回この運用によりまして、全体的に高浜3号、4号でいきますと、施栓率は4%ぐらいになっているんですけれども、こういった状況を踏まえて今回取替えを行って、応力腐食割れ対策ですとか、あとはスケールの一掃といったことを行うということで、今回変更の申請になってございます。

(岡田委員) ありがとうございます。

以上です。

(上坂委員長) それでは、上坂から幾つか質問させていただきます。

今回の高浜3、4号では、蒸気発生器3台、これが全て取替えということでしょうか。

(奥安全規制調整官) 原子力規制庁の奥です。

御認識のとおりです。

(上坂委員長) それから、この材質なんですけど、伝熱管の材料の改良とあります。以前は、現在スペシャルメタル社製のインコネル600という形のニッケルクロム鉄合金が使われていたかと思うのです。今回のTT690合金。両者の違いはどこになりますか。

(奥安全規制調整官) 原子力規制庁の奥でございます。

今回取り替えますTT600合金ですけれども、委員長からおっしゃっていただいたものと比べますと、クロムの含有量が更に増加しておりまして、応力腐食割れへの耐性が更に強化されたものとなっております。

(上坂委員長) 分かりました。

それから、蒸気発生器の伝熱管の外面減肉がありますが、これは渦電流非破壊検査で、現在もこの減肉は監視されているのでしょうか。その場合は、元の厚さに対して何%減肉する

のですか。それから、何%以上減肉しますと、その伝熱管に栓をしたりして使わないようにするとか、そういうことはあるのでしょうか。

(奥安全規制調整官) 原子力規制庁の奥でございます。

御質問いただきました事項についてですけれども、直近の事例で申し上げますと、2024年1月に報告されました高浜発電所4号機の伝熱管の損傷事例におきましては、直近でも外面減肉が観測されておりまして、直近の事例が2024年1月の高浜発電所4号機の事例になるんですけれども、最大の減肉率は約6割となっております。

関西電力におきましては、こうした渦電流の探傷試験によりまして、20%以上、2割以上の減肉が確認された場合には、有意な信号として認め、対策を行うということになってございます。

以上です。

(上坂委員長) ありがとうございます。

それから、35年ほど前なのですけれども、この伝熱管で外面減肉から貫通亀裂が生じて、1次系冷却水が2次系に漏れる事象が生じました。昨今ではもうこういう事象が起きていない、かつ最後に起きたのはいつ頃でしょうか。

(奥安全規制調整官) 原子力規制庁の奥でございます。

高浜3号、4号におきましては、今おっしゃっていただいた亀裂による1次冷却水の漏れといった事象は発生したことはございません。そういった貫通亀裂が生じた過去の実績ということですが、2点ございまして、一つが1991年に発生をしました美浜2号機の伝熱管損傷事例が一つありますのと、あとは1995年の大飯2号の事例がございます。それ以降は貫通亀裂による1次冷却系が2次系に漏れると、そういった事象はそれ以降は発生していないということで承知しております。

(上坂委員長) どうもありがとうございました。よく分かりました。

それでは、委員の方から追加の質問ございますでしょうか。

それでは、1枚目の資料の別紙裏にございますように、本申請に関する発電用原子炉が平和目的以外に利用されるおそれがないかどうか。これは原子力委員会の方で審議いたしまして、答申したいと存じます。

本日は説明どうもありがとうございました。

(奥安全規制調整官) 本日はありがとうございました。御審議のほどどうぞよろしくお願いたします。

(上坂委員長) それでは、議題(3)は以上でございます。

次に、議題(4)について事務局から説明をお願いいたします。

(梅北参事官) 今後の会議予定について御案内いたします。

次回ですけれども、次回定例会議については5月28日火曜日14時からということで、場所はこの同じ場所、8号館6階623会議室になります。議題については調整中でありまして、ホームページなどによってお知らせいたします。

(上坂委員長) ありがとうございます。

その他、委員から何か御発言ございますでしょうか。

御発言ないようですので、これで本日の委員会を終了いたします。お疲れさまでした。ありがとうございます。

—了—