

第33回原子力委員会定例会議議事録

1. 日 時 令和7年9月24日（水） 14：30～16：32

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、吉橋委員、青砥参与、岡嶋参与、小笠原参与
内閣府原子力政策担当室

恒藤審議官、井出参事官、中島参事官

日本原子力研究開発機構

呉田センター長、藤グループリーダー

4. 議 題

（1）国内に眠る有価物の活用を目指した3つの研究開発（日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 NXR開発センター センター長 呉田 昌俊氏）

（2）「最も測定が困難な核物質」を非破壊測定する新技術（日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 原子力センシング研究グループ グループリーダー 藤 暢輔氏）

（3）その他

5. 審議事項

（上坂委員長）それでは、ちょっと事情がございまして、開始が遅れて大変申し訳ございません。それでは、令和7年第33回原子力委員会定例会議を開催いたします。

本日は、青砥参与、岡嶋参与、小笠原参与に御出席いただいております。

なお、小笠原参与はオンライン出席でございます。

本日の議題ですが、一つ目が国内に眠る有価物の活用を目指した三つの研究開発について、二つ目が「最も測定が困難な核物質」を非破壊測定する新技術について、三つ目がその他でございます。日本原子力研究開発機構からの御説明でございます。

それでは、事務局から説明をお願いいたします。

(井出参事官) それでは、一つ目の議題でございます。国内に眠る有価物の活用を目指した3つの研究開発についてということでございまして、日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所・NXR開発センター・センター長、呉田昌俊様より御説明を頂きたいと思えます。

本件は、「原子力利用に関する基本的考え方」の3の8、原子力利用に係るイノベーションの創出に向けた取組に主に関連するものです。

それでは、呉田センター長から御説明をよろしくお願いいたします。

(呉田センター長) 原子力機構、NXR開発センターの呉田と申します。

まずは、本日遅れてまいりましたこと、機構を代表いたしまして、おわび申し上げます。

本日は、お手元にある資料、国内に眠る有価物の活用を目指した3つの研究開発について、御紹介させていただきます。

めくっていただきまして、原子力機構は2年ほど前に「ニュークリア×リニューアブル」で拓く新しい未来というビジョンを掲げまして、シナジー、サステナブル、ユビキタスという三つの柱で研究開発を進めております。NXR開発センターのNXRはこの「ニュークリア×リニューアブル」から持ってきたものでございまして、昨年4月に、茨城県東海村にあります原子力科学研究所内に設置をされたセンターでございます。社会実装を目標とした、開発を重視した、これまでの原子力機構にはなかったネットワーク型の組織でございます。

続きまして、2ページ目でございます。

原子力の利用というものは発電だけではございません。私たちは原子力が持つ様々なポテンシャルを引き出す技術開発に挑戦を始めました。これをNXRプロジェクトと私たちは呼んでおります。一言で言いますと、これまで捨てる対象であったものや、使っていないもの、これらを利用する、価値を創り出す時代に変えるための研究開発でございます。一つは濃縮プラントで発生いたします劣化ウランを利用する。一つは希少金属を廃棄物の中から回収して利用をする。一つは発熱性の元素を熱源や電源として利用することを考えております。

次のページをお願いいたします。

三つ、チャレンジを始めました。最初にウラン蓄電池の開発につきまして、次に半永久電源の開発につきまして、最後に資源を創る時代に向けて、有価元素を分離して、利用する技術の開発につきまして御紹介をいたします。

次のページ、4ページ目でございます。

まず、ウラン蓄電池の開発によって解決したい課題について説明いたします。2つございます。再生可能エネルギー導入時の電力系統の安定性に関わる課題と、燃えない劣化ウラン

の活用に関わる課題でございます。今年の２月に第７次となりますエネルギー基本計画が策定されましたが、１５年後の２０４０年には、再エネの比率を現在のおよそ２倍に引き上げるとのことでございます。同じエネルギー基本計画によりますと、再エネは発電量が大きく変動するため、電力系統の安定性に影響を及ぼす可能性があるということだそうです。このため、長期エネルギー貯蔵技術、ＬＤＥＳと略されている技術の同時導入が不可欠となっております。

そこで、私たちは国産の長期エネルギー貯蔵技術といたしまして、使われていない劣化ウランを電力系統の安定化に役立てたいと考えております。右の写真は原子力機構の人形峠サイトで、以前、ウランの濃縮をしていたときに発生した劣化ウランを入れたシリンダーと呼ばれる容器の写真でございます。日本はこのように劣化ウランを現在、１万６，０００トン保有をしております。商業用の濃縮プラントでの原発用の濃縮ウランの生産量が、今後増加していきますと、劣化ウランの保管量も増加をいたします。高速炉のブランケット燃料としての利用まで当面の用途はないようでございます。

そこで、私たちはこの貯蔵されている劣化ウランに電気をためる、蓄電に使えるようにウラン蓄電池の開発を始めました。

次のページをお願いいたします。

このページは、ウラン蓄電池の代表的な導入のイメージを示しております。例えば原子力施設にウラン蓄電池を設置して、再エネの余剰電力を蓄えて、地域の需要が増えた際に電力を地域に供給するといった使い方を示しております。

次のページをお願いいたします。

略してウラン蓄電池と呼んでおりますが、ウランレドックスフロー蓄電池というのが正確な技術名称でございます。その概要を示しております。ニュークリア×リニューアブルの相乗効果、シナジーを実現する技術でございます。余った電気をためて、足りないときに電力消費地に供給することで電力の需給のバランスの最適化に役立てたいと考えております。ウランの電解液はほとんど劣化しないため、長期運用によって発電コストを低減できると考えております。また、原子力施設の非常時電源としての活用ができるとも考えております。

続きまして、７ページ目でございます。原理、長所をこのページを使って説明いたします。

これはフロー蓄電池共通なのですが、充放電するセルと呼ばれる部品と電気をためるタンクとが、配管で接続された構造となっております。両極の活物質を含む電解液と呼びますものを流動させて、タンクに電気をためるという構造です。初めには負極側にはウランの４

価を、正極側には鉄の2価を入れておりまして、電圧をかけて充電をいたしますと、ウランも鉄も3価に変わります。この3価の状態が充電された状態でございます。この状態で電気回路に電気が流れる状態を作り出しますと、放電をいたしまして、ウランは4価に、鉄は2価に戻ります。このような原理のため、タンクを大きくすれば電気をたくさんためられるということになりまして、10メガワット級以上の大容量の蓄電所として使うことができると考えております。

フロー蓄電池として既に実用化されているバナジウムレドックスフロー蓄電池と比較いたしますと、反応速度が速いために、電流値が高いときにもロスを少なくして蓄電ができると、電気化学的な理論値は示しております。あとバナジウムは中国から現在100%輸入されておりまして、近年価格が高騰していると聞いております。このようなことから、ウランの方は国内に既にある劣化ウランを使うということから、純国産であると言えると思っています。

次のページ8ページ目をお願いいたします。

これまでウラン蓄電池の研究につきましては、反応に関する研究にとどまっておりました。実際に電池が構築された例はございませんでした。実際にやってみますと、沈殿物ができてしまって、随分と原子力機構の研究者も悩まされて、スタートを始めました。それが昨年度、世界で初めてとなるウランを用いた蓄電池を構築することができまして、充放電に成功をいたしました。従来の研究との違いは、有機溶媒とイオン液体を電解液に使っていることと、あと正極側を鉄に変えた点でございます。その結果、従来研究よりも電解液の組成をシンプルにすることができまして、更に起電力もウランの場合1.1ボルトであったことに対して、ウラン鉄で1.3ボルトと起電力も上げられて、性能も向上できております。

次、9ページ目でございますが、今年3月にプレス発表を行いました。まだ、画面の中央、左辺りにあるほどの、まだ手の平サイズのタンクも付いていない、循環をされていない小さなものではございますが、放電いたしまして、右上に白のプレートの「X」の下の方に、赤色のLEDを組み込んでおりまして、これの点灯に成功をいたしました。プレス発表後、国内外から多く反響を頂いているところでございます。

続きまして、10ページ目でございます。

開発のプランを示します。現在は電気の容量を増やすことを目指しておりまして、まずは電解液を循環させる、フローさせるフロー型を開発中でございます。今後、デスクトップ規模の5ワット規模の蓄電池を実証した後、その1,000倍の5キロワット規模の実証を目指す計画でございます。ここまでは東海村、原子力科学研究所の第4研究棟で実施予定でござ

ざいます。4年後の2029年度には、電力系統に接続をして、家1軒分ぐらいの蓄電量の施設を造って、実証したいと私は思っております。実施場所は未定ではございますが、原子力施設立地地域にまずはパイロット施設と呼べるようなものを造って、規模をステップアップするのがよいだろうというふうに考えております。

続きまして、11ページ目でございます。

では、系統用蓄電池といったものは、ほかにどのようなものがあるのかということで、比較した表を示しております。一番右側のレドックスフローという欄でございますが、これは実用化されているバナジウムレドックスフロー蓄電池を指しております。赤字で示した箇所が長所でございます、メガワット級以上の大容量化ができる。また、充電状態の監視ができる、また安全性に優れており、サイクル回数も原理的には制限がないといったところにメリットがございます。更にバナジウムの場合、資源の欄に青の三角と評価されておりますが、劣化ウランであるならば、ここは国内にあるものでございますので、二重丸になると考えております。

続きまして、12ページを説明いたします。

社会実装に向けてでございますが、まだまだ開発を始めたばかりでございます、技術的な課題は多くございまして、チャレンジが続いている状態でございます。セルの要素技術であったり、流動させる、また大容量化させるといったことに関する技術開発が必要でございます。また、長期信頼性に関わる実証も必要だと考えております。電解液をたくさん作る技術といったものの確立も必要であると考えております。

社会への導入課題といたしましては、これは核反応を伴わない使い方でございます、そのため、規制に関するものであったり、許認可に関わるようなものにつきまして、規制当局との確認というものが必要だと考えております。また、核燃料物質として資源循環をさせる見通しを得るといったことも大切だと考えております。

導入戦略でございますが、まずは原子力施設立地地域から、原子力関連事業者、再エネ事業者、また電力送配電事業者、また、製造メーカーやこういった事業者の皆様と連携をして、地域振興の形で、産官で今進めようとされているワット・ビット連携などにも貢献する形で導入を目指したいと考えてございます。

続きまして、13ページ目でございます。

次に、半永久電源の開発につきまして御紹介をいたします。14ページ目でございます。

半永久電源、また半永久熱源の開発によって解決したい課題でございますが、ごく低温と

なります月の夜中であるとか木星よりも遠い深宇宙では、半導体が機能しなくなるという課題があるそうでございます。また、100年間メンテナンスフリーのワット級の国産の熱源や電源がないといったことが、宇宙業界では課題になっていると聞いております。そのため、内閣府の宇宙政策委員会で策定をされております宇宙技術戦略におきましても重要な技術として明記されております。

右の図の下の方に36分の1とか100分の1と書かれておりますのは、太陽光の強度が地球上と比べるとこれだけ減るということを示しております。木星より遠い惑星などの探査には太陽光パネルが使えなくなると聞いております。また、電源だけではなく半導体や、また姿勢制御用の燃料の保温も必要であって、熱源も必要となっているそうでございます。

次、15ページ目でございますが、このような背景を受けまして、私たちは宇宙・極地・地下など、人が容易に近づけない場所でも100年間メンテナンスフリーで使える熱源と電源をまずは宇宙開発、そしてリモートモニタリング、重要機器の機能維持のために使用可能にしていきたいと考えております。地球上で想定している用途は南極や海底での観測機器用の電源であったり、保温用の熱源、また地下処分場でのモニタリング機器用の電源、また、より将来になるとは思いますが、原発や病院、IoT機器など、重要な機器の機能維持用の電源などを利用先として考えております。

次、16ページに移ります。

熱源について説明いたします。これまでアメリカとロシアがプルトニウム-238を熱源とした電源を宇宙利用してきております。また、欧州とアメリカはアメリシウム電源の開発を開始しております。ただ、アメリシウムを安定化させるためにこの中に核燃料も混ぜているとの報告がございます。日本ではプルトニウム-238の製造と電源利用は実質的に不可能でございます。この代替となる核種はアメリシウム-241となります。アメリシウムは使用済燃料から分離して手に入れる方法と、保管しているMOX燃料中のプルトニウム-241がベータ崩壊して自然に生成・蓄積するので、月日がたったMOX燃料から分離する方法、この2通りがございます。原子力機構は宇宙用に関しましてはMOX燃料からの化学分離による提供を考えているところでございます。これまでアメリシウムは発熱する放射性廃棄物として嫌われる対象物でございましたが、それを有効に利用するという話でございます。プルトニウム-238と比べますとこのアメリシウム-241は半減期が5倍と長いため、発熱量はプルトニウム-238の5分の1と低くなってしまいますが、長持ちするというところでございます。このため、私たちは半永久電源と呼んでおります。実際の運用を考える際、

アメリカシウムは核燃料物質ではなく放射性同位元素、R I として管理できる点も重要なポイントでございます。

続きまして、17 ページ目でございます。

宇宙用の半永久電源のイメージをこのページに示しております。本プロジェクトでは発熱体はアメリカシウム-241 です。左の方ですが、放出されるアルファ線は熱化して発熱をいたします。これをペレットにして管に封入して、発熱体ユニットとして組み込みます。熱源と放熱板の間に熱電変換デバイスを挟み込みまして、このデバイスの右の図にありますように、高温側と低温側の温度差によって電気を作ります。

続きまして、18 ページ目でございます。

私たちはこれまでアメリカシウム発熱体を製造する技術の開発を進めてまいりました。基本方針は、宇宙関係者が国内にある資源と国産技術でこれを実現したいとの要望がございまして、これを踏まえまして、このような技術開発を昨年度まで、まずはペレットと呼んでいまず焼結体を製造する技術を確認するということを行ってまいりました。プルトニウムからアメリカシウムを分離いたしまして、安定なペレット焼結を小規模で実証しております。下の写真にあります、左上の方からなんです、プルトニウムが溶解している液からアメリカシウムを化学分離して、沈殿をさせて、安定化させるための添加剤を混ぜて、焼結をして、ペレットを右下の写真のように作っております。

続きまして、19 ページ目でございます。

開発の現状でございますが、実用化に向けた開発を J A X A が公募されました宇宙戦略基金事業といたしまして、今年3月末から4年間の事業として開始をいたしました。連携機関は産総研でございます。企業2社とも連携をしております。達成目標は実際に宇宙機に搭載することを想定したプロトタイプを組み上げまして、発電を実証することとでございます。2029年度以降、J A X A への提供を目指しております。これまで実証してきた技術をベースといたしまして、真ん中の赤枠で囲ってあります五つの課題に取り組んでおります。

続きまして、20 ページ目でございます。

最後に三つ目のチャレンジ、資源を創る時代に向けた放射性廃棄物中の有価元素を分離して、利用する研究開発について御紹介をいたします。

21 ページ目でございます。

これまで資源は採る時代であったと思います。これを原子力技術によって創る時代に変えていきたいと考えております。原子炉や加速器で資源となる元素を作り、また、分離をして

利用する元素創成工場といったものをイメージしております。これによってレアメタルの一部を国産化したり、医療用を含めたR I のオンデマンド供給であったり、半永久電源を社会に提供できるようにしていきたいという考えです。これまで原発では核分裂連鎖反応で生じたエネルギーを電気として活用してまいりましたが、使用済燃料中に含まれている核分裂生成物F Pは、放射性廃棄物として扱われてきております。しかし、含まれている元素をよく見てみますと、使えそうな元素が含まれております。

そこで原子力機構の分離・利用技術によりまして、有価物として利用できるようにしていきたいと考えております。放射性廃棄物を宝の山に変えて、資源を確保して、更に処分の負担を最小化したいと考えております。下の方に書いております元素は我々が特に注目している元素と、その使い方でございます。

続きまして、22ページ目に移ります。

有価元素分離プロセスの位置付けを示しております。現在までに考えられてきている核燃料サイクルを、上の方に書いております。これに再資源化を目指した有価元素分離プロセスと、廃棄物の減容・有害度低減を目指したマイナーアクチノイド分離プロセスの二つの機能を追加したい構想です。減容・有害度低減の研究開発は、現在、文科省の原子力システム研究開発事業で開発中でございまして、地下処分場の面積縮小が主な目的でございます。再資源化の方は医療や工業分野での利用が目的でございます。

続きまして、23ページ目に移ります。

分離プロセスの開発状況でございますが、六ヶ所村にあります再処理工場と同じ溶媒抽出法を中心とした分離プロセスの開発を進めております。左側が使用済燃料を溶解した液で、右下に行くほど化学分離フローの最終段階となってつながっているフロー図でございます。これまで左側の赤の点線で囲ってある「S E L E C Tプロセス」と我々が名付けております処理方法を、これに更に再資源化のために「S E L E C Tプロセス」を拡張する形で、青の点線で囲ったような様々な有価元素の分離技術を開発中でございます。

次に、24ページ目でございます。

昨年度の主な成果の一つを御紹介いたします。これは半永久電源用のアメリシウム-241をプルトニウムから分離する技術といたしまして、新しい実用的な分離回収方法を開発した内容でございます。3月にプレス発表をいたしました。全ての溶媒などを燃やすことができる方法でございまして、結果として固体廃棄物をかなり減量できるということ、また、蒸発缶といったものを使わない常温で濃縮ができる方法であるといったところに、実用性が高

いというふうに我々は考えております。

次、25ページ目でございます。

ロードマップにつきまして、説明をいたします。様々な技術開発や検討といったものを同時並行して進める必要がございます。優先順位といたしましては、我々は発熱性元素であるアメリシウム、それからストロンチウム、セシウム、これらの分離を優先しております。その後、ストロンチウム-90につきましては、ベータ崩壊してできる医療用R Iであるイットリウム-90を分離いたしまして、がん治療のために社会に提供できる道筋を付けたいと考えております。この医療用R Iの利用も2029年度から社会への提供を目指しております。

最後、26ページ目でございます。

以上、まとめますと、現在、日本が抱えております様々な課題を踏まえまして、ウラン蓄電池、そして半永久電源、そして有価元素の分離・利用といった技術を開発いたしまして、右の欄に書いてありますような再エネの有効活用、劣化ウランの活用、極地での利用、また医療や産業での利用、そして処分負担の最小化といった新しい価値を創り出していきたいと考えております。

以上でございます。

(上坂委員長) 説明ありがとうございます。

原子力技術の新しい展開に関する重要な研究開発の話だったと思います。

それでは、今の御説明に対しまして、40分間をめどに質問をさせていただきたいと思えます。

では、直井委員からよろしくお願いします。

(直井委員) どうも呉田センター長、大変分かりやすい御説明ありがとうございました。いずれの技術も夢のある研究開発になっておりまして、是非とも社会実装まで持っていただきたいというふうに思います。

まず初めに、ウランレドックスフロー蓄電池についてお伺いしたいと思います。7ページから10ページ辺りで、510メガワット級の大容量化が可能になるが、フロー化が鍵との御説明がございました。なぜこのフロー化が鍵なのか教えていただけますでしょうか。

(呉田センター長) まず、大容量化するためには電力を多く蓄える必要がありまして、このフロー蓄電池では大きなタンクを接続させて、循環させて大容量化いたします。そして、二つの正極と負極側それぞれ、例えばウランの場合ですと3価と4価、鉄の場合ですと2価と3

価の間で変わるタイミングで、同期した形でフローをうまくさせていくという制御が必要で
ございます。

また、流量を増やしてまいりますと、どうしても動圧といいます、流動で圧力が変わっ
てまいります。そういったところもうまく制御していくことが必要だというふうに聞いてお
ります。そういった意味で、電力を効率よくするための必要があるため流動の速度の最適化をす
る必要があるといった点と、それから、流動の最適化をすることによってできるだけエネル
ギーロスの少ない形で電力を効率よくためていくという、そういう最適化が見込めないとい
けませんので、そういった観点で流動が大切であると考えております。

(直井委員) どうもありがとうございます。

続きまして、アメリカウム電池について伺います。

16ページのところに、10グラム当たりの出力ということで、1.1ワットというデー
タが出ていますけれども、ユーザー側からの出力ニーズというのはどれぐらいでしょうか。

(呉田センター長) これもどのような使い方をするかによって何種類かあるというふうにお伺
いしております。まず、一番低出力のものは、例えば月の裏側であったり、深宇宙探査機で
の半導体の機能維持のために、0.5から1ワットぐらいあればかなり使い勝手がいいもの
ができるというふうに聞いております。ただし、初期の段階からはそこまでは要求しない。
まずは0.1ワット規模でちゃんと発熱して、半導体やそういった重要なものを生かしてお
くといったところに重点があるというふうに聞いておりまして、次のステップとして、0.
5から1ワット級のものが深宇宙探査等で期待される値であるというふうに聞いております。

そして、その後は月の裏側で、もう少し規模の大きい使い方といったもので、その10倍
程度のものが次のステップで期待するということでございまして、その際には我々が考えて
いるものは、一つのユニットを複数個同時に使うという使い方を御提案しているところで
ございまして、その使い方であれば、他のニーズにマッチするというふうに聞いております。
ただ、残念ながら今の量では、ちょっとローバーのようなかなり大きな装置の動力源として
の使い方はまだ足りていないというふうに聞いておりますが、我が国ではそこまで考えてい
ないということで、我々が最初に開発する1ワット弱ぐらいのもので、まずはしっかりと使
っていききたいということでございます。

(直井委員) どうもありがとうございます。

最後に、使用済燃料から有用な物質を分離して活用していく研究開発ですけれども、レア
メタルを自国で生産する、また放射性廃棄物の有害度を低減する技術開発、これも是非社会

実装を果たしていただきたい技術です。この社会実装を考えた場合、再処理施設にもう一つ化学工場を設置するようなイメージかと思うんですけれども、どんなイメージを考えておられるか、教えていただけますでしょうか。

(呉田センター長) ただいま、直井委員からお話がありましたようなイメージでございまして、今あるプラントの横なり近くに、ピューレックス法で分離した後の、今ガラス固化体に行っている廃液を、このページで示しましたようなフローで分離を実現するようなイメージです。溶媒抽出法というのは、既にあるピューレックス法もそのような方法でして、ミキサセトラ型溶媒抽出器というものが並んでいる工場といったものをイメージしております。

(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) 次に、吉橋委員、よろしくお願いします。

(吉橋委員) 呉田センター長、御説明ありがとうございます。

廃棄物処理が問題となっている中で、どうやって捨てるかという方向ではなくて、捨てるものとか、使っていないものを利用するという取組は非常に面白いと思いましたが、今回御紹介いただいた研究成果も非常に興味いたしました。これらが社会実装できれば非常にインパクトがあるなというふうに感じたわけなんですけれども、一つ技術的なところで、先ほどの蓄電池でフロー型にするというところがあったと思うんですけれども、7ページ目を見て、タンクのところに電気をためるということなんですけれども、電気をためるにはどちらも3価にするということだったと思います。

(呉田センター長) はい、そうでございます。

(吉橋委員) ただ、流動させているということは、この溶液の中には3価も4価も混在している状態で、特に3価をタンクのところに多くためているというわけではないですか。逆に言うとなんかそういうところができるというか、タンク内ではどういう状態になっているか教えてください。

(呉田センター長) ありがとうございます。

まず、充電のときにはウランは4価から3価に、鉄は2価から3価に、セルの内外でまず電子のやり取りが起こりまして、イオンの価数が変化いたします。それをポンプによって、タンクの方に送り出すと同時に後ろの方から、まだ3価に変わっていない4価のウランや2価の鉄のイオンが供給されるということで充電といったものが成り立ちます。次に、放電はその逆の動作をさせることによりまして放電します。うまくポンプの回転数を制御すること

によりまして、セルから電気が流れます。

(吉橋委員) ありがとうございます。

先ほど制御というお話をされていたので、これからその辺りをどれくらいのペースで制御して、流していくのかということを検討することによって効率だったり、どれぐらいためられるかというのが変わってくるということですね。

(呉田センター長) はい、そういうことでございます。基本的な原理は既に実用化をされているバナジウムレドックスフロー蓄電池と全く同じでございまして、ただ、パラメーターとこの業界では言われているんですけども、そのパラメーターといったものが一つ一つのセルの大きさであったり、複数セル並べるんですが、その複数セルの特徴であったり、それからタンクの大きさであったり、そういったもので決まる、パラメーターの最適値が違うということでございまして、制御のやり方の根本的なところは既にある技術がかなりベースとなっていて、実用化できると考えております。

(吉橋委員) ありがとうございます。

そうなると大分実用化にも社会実装にも大分近づくのかなと思うんですけども、このウラン蓄電池の利用場所、設置場所というのを想定されているのは、やはりメガソーラーがあるようなところだとか、発電所の横というようなイメージでしょうか。

(呉田センター長) ありがとうございます。

はい。まずそういったところから導入をするのが、設置場所として最適なのではないかという考えがございます。この辺は電力の系統の事業者さんとも色々と相談しています。需要と供給が多いところが一番良く、電気系統の混み具合とか、色々と地域地域によって導入条件が違うというふうにお聞きしております。また、データセンターのような大電力が今後必要になる施設といったものをうまく絡めるのが良いと思っています。ソーラーであるとか洋上風力でためることはできますから、同時に使う先もうまく見付けて、そこで充電と放電をうまく使いこなすということが、電気系統の色々な課題解決策として一番望まれている長期エネルギー貯蔵技術のポイントですので、そういったところに導入していくということがいいと思っております。

まずは原子力施設がというふうに申し上げておりますけれども、これは管理区域を設定できれば、核分裂は起こさないものでございますので、管理はきちんと必要でございまして、従来原発のような施設であることは必ずしも必要ではないというふうに考えております。

(吉橋委員) ありがとうございます。

今おっしゃられた管理区域ということで、社会実装をするときに、規制とかもそうなんですけれども一般のところに使用する際、やはり安全性の説明というのがこれから必要かなと思います。ウラン電池というとやっぱり危ないんじゃないかと思われる方もいると思うので、最初の方にあった劣化ウランというのは核反応を起こしにくいものですよということで、更に含有量がすごい少ないですよとか、そういった説明というのは今後、実際に社会実装をする上では必要になってくるのかなということを思いました。

(呉田センター長) ありがとうございます。

御指摘のとおりでありまして、パブリックアクセプタンスといった観点で、丁寧にこういうものであるといったことをお伝えしていくというのは必ず必要なことであると思っております。ありがとうございます。

(吉橋委員) すみません、もう一点だけ。半永久電源なんですけれども、これ実際今、熱電変換デバイスの効率ってどれぐらいなのかということだけ教えてください。

(呉田センター長) 現在、我々が使おうとしております比較的低温用、二、三百度用のビスマステルル系と呼ばれるものに関しましては、10%に満たない、5%から10%の間ぐらいのものが多く運用されております。これを我々は、宇宙空間は片方が非常に低い温度になるといったことで、できるだけ10%に近い形で使いたいとは思っております。ただ、設計上、なかなか悩ましい点がございまして、それは宇宙用ならではのなんですけれども、耐衝撃性であったりとか、色々な条件をクリアさせるために効率だけを優先させるわけにもいかないということが、これまでのエンジニアリング検討で分かってきておりまして、5%から10%ぐらいの間ぐらいで落ち着いてしまうのかなというふうに考えております。

(吉橋委員) ありがとうございます。

私からは以上になります。

(上坂委員長) それでは、参与からも御質問や御意見を伺います。

青砥参与から御意見を頂ければと思います。青砥参与、聞こえますか。

(青砥参与) 聞こえております。私の声も聞こえていますでしょうか。

(上坂委員長) 聞こえております。よろしくお願いします。

(青砥参与) まず、興味深い御報告を、呉田さん、どうもありがとうございました。

様々に挑戦されていることに敬意を表したいと思います。

私の方からは色々とやられている中で、やはり人的にも資金的にも資源には限りがあると

考えています。この3課題について、優先度という考え方はあるのかということと、もしおありでしたら、順位とその理由を簡潔に教えていただきたいと思います。よろしくお願いします。

(呉田センター長) 青砥参与、ありがとうございます。

それでは、3ページ目を開いていただきたいんですが、まず、ニーズ対応を急ぐ必要があるという観点から優先順位を付けますと、この3ページ目に書いて、先ほどお話しいたしました順番でございしますが、「ウラン蓄電池」、「半永久電源」、「資源を創る時代に」の順で考えております。まず、ウラン蓄電池を最優先と考えております理由は、2030年代から多く再エネが導入され、長期エネルギー貯蔵技術といったものが必要になってくる時代になってくると考えて、これに間に合わせたいと考えているためでございます。

二つ目の半永久電源に関しましては、これは宇宙技術戦略で開発が非常に重要であるというふうに国で位置付けられている、期待されている技術でございますので、実はこの3番目の資源にという中の一部ではございますけれども、特出しをして宇宙戦略基金で2029年、宇宙での利用といったものを目指すという具体的な目標を掲げておりますので、これに間に合いたいという意味で今申し上げております。

なお、3番目につきましては、非常に社会的なインパクトが大きいという観点だと最優先にすべき課題だと考えております。半永久電源は宇宙戦略基金でやっており、ウラン蓄電池と資源の活用に関する研究開発につきましては、原子力機構に交付された国の予算でやっているところでございますが、両方同じぐらい支出をいたしまして、研究開発に臨んでいるところでございます。

そういう意味で、ニーズを急ぐ順番にということだと、1、2、3、規模の大きさからという3番目ということになろうかと思います。

以上でございます。

(青砥参与) 考え方を、ありがとうございます。発表の中にもありましたが、それぞれ実用化には課題が残されていると理解しています。是非、一部明らかなところもありましたが、それぞれに明確なマイルストーンを設定の上、実用化に向けて現実解を見いだして、達成していただければと思います。期待しております。

私からは以上です。

(呉田センター長) ありがとうございます。

(上坂委員長) ありがとうございます。

それでは、岡嶋参与からも御意見を頂ければと思います。

(岡嶋参与) 呉田さん、どうも御説明ありがとうございました。

かつて私もこの分野での研究に従事したりしておりましたので、内容を聞いて、かなり進んできているなという実感をしました。特に基礎基盤研究ですね、原子力分野の基礎基盤研究がこういう形で成果と結びつくような形にしていくというのは、私は人材育成とか、そういうことも含めて重要なことかと思います。

私からはコメントなんですけど、今も青砥参与からの質問にもありましたが、それぞれのテーマの進み方も違うだろうし、いろんなことがあるだろうけれども、最終的にはこの研究はやはり社会で使われるという形の成果を求めるものだろうと思います。そういう点で進めていくに当たって、早い段階から、僕は技術成熟度レベル、TRLというものを意識して、今どの段階にあって、それでどこまで達成していくのかというような筋道を見ながら、もちろんこの中で開発プランやロードマップという形で示されていますけれども、より現実的にその辺りを進めていく形にさせていただけたらいいかと思います。是非、そういうふうにして進めていっていただけたらと思います。

よろしくお願ひしたいと思います。期待しています。

以上です。

(呉田センター長) 岡嶋参与、ありがとうございます。

(上坂委員長) それでは、小笠原参与から御意見、御質問を頂ければと思います。

(小笠原参与) どうも、大変夢のある話、ありがとうございました。

これらの技術はいずれも経済安全保障の観点から非常に重要だと思います。特にエネルギー供給ですとか、あるいは医療用のアイソトープ、それから資源といったものの海外依存度を低めることに貢献してくれるというもので、これが早く社会実装されることを大いに期待したいと思います。その中でも特にウランレドックスフロー蓄電池は、これまでも中国から100%というお話がございましたけれども、輸入しているパラジウム電池を将来的に代替し得る技術だということで、その重要性は高いと思います。

ここで二つ質問なんですけれども、蓄電というと、電気自動車なんかに搭載するような小型化された蓄電池というものが非常に注目されています。このURF蓄電池については非常に大きな規模のものについてのお話がございましたけれども、将来的には小型化され、EVなんかにも使えるようなものにまで発展していく可能性はあるのかということ。それから、この技術は国内で作ることが重要だと思うんですけれども、価格等の条件からして、西側の

他国から買ってしまった方が早いのではないかという観点もあるのかと思います。アメリカとかフランス等で、こういった劣化ウランなんかを持っているところに同様の技術があるのかないのか、あったとしても日本の技術が優位性を持っているのかどうか。以上2点について、お伺いしたいと思います。

(呉田センター長) ありがとうございます。

まず、大容量蓄電池としての使い方以外に、EVのような使い方についてというのは、多くはまだ議論は至っていないんですけれども、ウランで溶液系のものであるといったことでありますので、ある場所に固定して使うといった使い方であるならば、もちろん低容量のものとして使うことはできるものであらうと思っております。また、例えばリチウムイオンバッテリーが多く今世界で使われようとしておりますけれども、長い期間、8時間以上、電気を貯蔵する蓄電池というのを、長期エネルギー貯蔵技術と定義されているそうでございますが、リチウムイオンがその8時間程度ぎりぎりだそうでした、ウランの方は10時間以上といった見込みもありますので、小型のものであっても、そのような充電して放電するまでの時間に、10時間以上時間差ができるような使われ方で定置型のものであれば、十分魅力ある蓄電池形式であらうというふうに聞いております。

また、二つ目のアメリカやフランスなど、濃縮プラントを持っていて、同様に劣化ウランの対応がある国との差別化の観点でございますが、まず、ウラン蓄電池に関しまして成功しているのは我々が初めてでございます、これまでも基礎的なウランウラン体系での基礎的な研究は諸外国でなされていると聞いておりますが、実際にある規模でプロジェクト的に行っているという話は聞いておりません。そういった意味で我々が先頭を走っており、さらに、他国はこのような研究を国単位で行っているとは感じていないという状況でございますので、我々といましては国内でこういった技術をしっかりと開発をして、海外にも御紹介したいというふうに、そのような考えでございます。

(小笠原参与) 大変心強い回答をありがとうございました。大いに期待したいと思います。ありがとうございました。

(上坂委員長) それでは、上坂から意見を述べさせていただきます。

まず、最初のテーマに関するところの劣化ウランですが、4ページに国内1万6,000トンとあり、10ページにそれを全て使うと出力予測があり、濃縮が進めば更に資源が増えるとあります。これは、日本原燃は来年、再処理工場しゅん工、それから翌年に濃縮燃料工場がしゅん工の見込みですけれども、そこを想定されているということでしょうか。

(呉田センター長) はい。増える方向の話につきましては国内ではそこしかないと思っております。現在までも六ヶ所ではある量を作られていると思いますが、大規模で今後原発用の商業用の核燃料を濃縮していく、そういう時代に入ってくると、そこが劣化ウランの発生源にもなるというふうに思っております、是非こういった劣化ウランを活用できる時代にしていきたいというふうに考えております。

(上坂委員長) 次に、アメリシウム電池の方のレドックスフロー、11ページでございます。ここに様々な電池の比較があり、レドックスフローが右側にあるわけです。先ほど来、岡嶋参与からお話がありましたように、見込みというときに技術的な成熟度を考えたときに、コストという面も当然出てきます。今、ここにあるNAS電池と出力的にはかなり近い状況だとしますと、既に実用化されております電池と比較して、大体コストの見込みというのはどんなふうでございましょうか。

(呉田センター長) 従来のこの表にあるバナジウムのレドックスフロー蓄電池、NASと同じぐらいだと間接的に聞いております。ただ、バナジウムの方は単価が高くなっておりまして、今後作るものは高くなっていくというふうにも聞いております。

レドックスフロー蓄電池は一回作ってしまえば、かなり安く運用できるというふうに考えております。課題は化学プラント的な電解液製造施設をつくるコストと、あと設置する場所に持っていく輸送に関わるコストの評価方法が決まっていない点にあります。どこで電解液を作って、液体の状態で運ぶのか、または設置場所の近くで液体に変えてやるのかとか、いろんなオプションが今あると考えておりまして、コストの算出がまだできていません。一回作ってしまうとNASと同じか、もっと安くできるというふうに思っております。

(上坂委員長) 分かりました。これはウラン蓄電池のケースですかね。

(呉田センター長) はい、そうでございます。

(上坂委員長) それから、13ページ以降のアメリシウム電池の方でございます。18ページに、プルトニウムからアメリシウムを分離して、安定なペレット焼結を小規模で実証という、ここまでの実証の技術の説明があります。JAEAではペレットは来年再稼働予定の「常陽」で、マイナーアクチノイドの減容の基礎実験を来年以降予定されております。また、現在、概念設計中の高速炉の実証炉においてもアメリシウムの取扱いというのが重要な課題と思います。このアメリシウムのハンドリングについては、高速炉の開発のグループとの共同はされているのでしょうか。

(呉田センター長) ありがとうございます。

これにつきましても、大洗の担当の理事、また所長の皆さん方とも一緒に今後、合理的にアメリカシウム（注）の分離、そしてその利用先として高速炉であったり、発熱体としての利用であったり、またそのほかの利用形態、発熱体から電力を作るといった使い方のための分離について、合理化を一緒に考えていきたいと思いますということで、今後、今2種類ぐらい大きく分けて方法がございますので、それを一緒に考えていこうと、合理的に考えていこうという方向でございます。

（上坂委員長）高速炉開発においてもアメリカシウムの取扱いの技術は非常に重要であると思いますので、是非協力してやっていただきたいと思います。

（呉田センター長）はい、その方向で今JAEA内では一致してやろうとしております。

（上坂委員長）次に、21ページの資源全体のお話です。下の方に様々な新しいといいますが、廃棄物から核種を資源として取り出していこうと。応用はここに書いてあるとおりでございます。実は私は前職の大学の教員をやっているときに、日本原燃のガラス固体処理の前のモリブデンを使えないかと検討しました。化学的に抽出して、それを遠心分離で同位体を濃縮しますと、例えば電子線形加速器ガンマ線源で照射する場合のモリブデン-100のかなり高濃縮ターゲットになります。非常に高純度のモリブデン-99が精製できる。その技術の検討をJAEAの方と検討したことがありました。

そうしますと次の25ページにロードマップがありました。技術的には可能だと思うのです。問題は時間。こういうロードマップとそれからコストもあるでしょうし、基礎研究はJAEAの原科研とか、それから大洗の研究棟の方でやる。先ほど来、話がありましたけれども、直井委員からの質問に対する回答もありましたが、しかるべき段階で六ヶ所に。今ある再処理燃料工場のサイトに建屋を造っていくという流れだと思うのですけれどもね。原燃の方がさっき申し上げましたようなタイムスケジュールでしゅん工していくということですからね。これはこの見込みでいくというふうに考えてよろしいでしょうか。

（呉田センター長）はい。また今後、原燃さんとか、そういう事業者の皆様方とスケジュールを調整していくとか、また、技術の進捗具合をこちらの方から適宜お伝えしていくということで、実現を目指していきたいなと思っております。また、地域の例えば青森であったり、原子力立地地域の皆様の振興になるような形といったものも積極的に考えていきたいなと思っております。

（上坂委員長）日本原燃、六ヶ所村は使用済燃料の再処理、それからMOX燃料の製造。これがまず大目標であります。その技術的なシーズはまさにここに書いてある。ある意味資源

の宝庫と言えるかもしれず、また、小笠原参与が言及されたように、これは経済安全保障の問題にも貢献できる。原子力はエネルギーという意味では、エネルギー安全保障への貢献ですけれども、レアアース相当の供給にも貢献できる。これはもう経済安全保障への貢献にもなりますよね。ですから、本当に六ヶ所村で今再生し、また育成しようとしている技術はこういう展開になるのだという意味で、非常に重要な研究だと思います。是非まずは基礎的なところは JAEA で、貴施設で。そしてまさに成熟度を上げて、コスト的にもいけそうになったら、是非六ヶ所村施設と連携しながら展開していただきたいと思います。

是非、よろしくお願いいたします。

(呉田センター長) 上坂委員長、ありがとうございます。

我々も、先ほど岡嶋参与からありました TRL のレベルで 2 とか 3 とか、そういう基礎基盤的な段階は我々の役目であると認識しております。そういった意味でまず技術的な基盤を我々の方で構築をして、あとメーカーの方、事業者の皆様と連携をして、そして一緒に事業をなす協働、共創といった考え方で、ネットワークを組んで、早い時期から共同研究また事業化に向けた検討といったものを始めて、将来、事業者様が実用化、社会実装につながるように、そういう体制で臨みたいというふうに考えております。

ありがとうございました。

(上坂委員長) 私も先週、IAEA 総会に出てきたばかりです。各国の首脳の方々、IAEA の幹部の方々とバイ会談を行ってきました。こういう技術というのは本当にできるのは限られた国でありますので、日本の役割といったときには非常に重要なと改めて痛感した次第でございますので、是非よろしくお願いいたします。

どうも御説明ありがとうございました。

それでは、議題 1 は以上でございます。

次に、議題 2 について、事務局から説明をお願いいたします。

(中島参事官) 続きまして、二つ目の議題であります「最も測定が困難な核物質」を非破壊測定する新技術につきまして、日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所・原子力基礎工学研究センター・原子力センシング研究グループ、グループリーダー、藤嶋輔様より御説明いただきます。本件は、原子力利用に関する基本的考え方の 3 の 1、「安全神話から決裂し、東電福島第一原発事故の反省と教訓を真摯に学ぶ」、に主に関連するものです。

それでは、藤グループリーダーから御説明をよろしくお願いいたします。

(藤グループリーダー) 原子力機構の藤です。よろしくお願いいたします。

まず、2 ページ目に本日の内容が記載してございます。

まず、初めに背景、その次に燃料デブリ中の核物質測定における課題、続きまして我々が開発してきました高速核分裂中性子同時計数法、また、従来法と F F C C 法との比較といたしまして実験とシミュレーション、最後にまとめと今後の展望となっております。

3 ページ目です。

3 ページ目ですけれども、御存じのとおり、福島第一原子力発電所の廃止措置では、事故で発生した燃料デブリの取り出しと安全な容器への収納・保管が検討されております。格納容器内には燃料デブリや鋼材、堆積物など様々なものが堆積しておりまして、特に燃料デブリ中の核物質については、その含有量を把握することで安全対策の裕度を適切に設定でき、保管時の合理化が期待されます。

ですが、一方で燃料デブリの本格取り出し時に適用できる核物質の非破壊測定技術は確立されていないという課題がございます。

4 ページ目に進みます。

我々は、燃料デブリというのは最も分析が困難な核物質の一つであると考えております。下の表に、まず左に核物質を分析する際の主な影響因子が記載してございます。一つは中性子吸収材を含有すること。こちらは中性子を使う分析が核物質の非破壊測定として広く用いられておりますが、これらの測定に多大な影響を与えます。また、ガンマ線は大量なガンマ線を放出いたしますので、放射線測定に大きな影響を与えます。また、新しい燃料と古い燃料が混在しており、核分裂生成物が抜けているということから、燃料デブリが放出する放射線から核物質を求めるのが困難、つまりパッシブ法の適用が困難ということがございます。また、非均質で様々な内容物を含みますので、下に示してございますように、非均質な試料を測定する場合には採取する場所によって核物質の含有量が異なりますので、部分採取で試料全体の核物質量を求めることが困難といえます。これは御存じのように、現在取り出されている少量のデブリであれば、化学分離などを伴う破壊分析によって、核物質の含有量を測定できるんですけれども、本格取り出しでは困難になるということです。また、その下にサイズが大きいということがございまして、この場合は試料内部の測定が困難になってきます。

我々は核物質の非破壊測定であるアクティブ中性子法の検討を進めてまいりました。また、こちらは放射線量やかさ密度などの測定に関しましては、既存のガンマ線測定や中性子測定、エックス線 C T 測定などが有効だと考えておりまして、これらの分析法と併用して実施する手法となります。

次に、5 ページ目に進めさせていただきます。

5 ページ目には、従来のアクティブ法について紹介させていただきます。

アクティブ中性子法とは、御存じのように中性子を照射して核分裂反応を引き起こし、核物質中性子を測定して、核物質を定量する手法です。代表的なアクティブ中性子法に、ダイアウェイ時間差分析法、D i f f e r e n t i a l D I E - A w a y A n a l y s i s、通称DDA法がございます。こちらは左の上に図が示してございますように、中性子を照射いたしまして、それを試料の周りに置いたモデレータや試料自身によって熱中性子化します。熱中性子と核物質との核分裂反応で出てくる核分裂中性子を測定いたします。アクティブ中性子法では、測定するのも中性子ですので、これを見分ける必要がございますが、これは下で説明させていただきます。

下にDDA法で得られるスペクトルが記載してございますけれども、横軸は照射してから経過時間、DDA法ではパルス状に中性子を照射いたしますので、そのパルス状で照射した時間からの経過時間となります。縦軸がイベント数であり、照射した中性子はすぐになくなりますけれども、核分裂中性子は、照射中性子が熱中性子になった後で核分裂反応を起こして放出されますので、この熱中性子になるために時間が掛かるということから、照射中性子に比べて遅れて出てきます。この遅れによって照射中性子と核分裂中性子の区別をしております。

右上に主な特徴が書いてございますけれども、まず核物質を直接測定できる。この場合、熱中性子による核分裂反応を利用していますので、主にウラン-235の量を測定することになります。また、大きな試料をそのまま非破壊測定できるということがあります。一方で、中性子吸収材の影響を受けやすいということがいえます。ですので、我々は中性子吸収材が反応しにくい高速中性子による核分裂反応を利用できないかということで、検討を進めております。この場合はウラン-238の量を測定することになります。

続きまして、6 ページですけれども、まず、高速中性子を従来のアクティブ中性子法に適用した場合ですけれども、左の図は前の図と同じでございます。右に高速中性子を利用した場合にどのような違いが出るかということですが、高速中性子を使った場合は、核分裂中性子は遅れませんので、照射中性子と核分裂中性子が同時に出てまいります。右下に、高速中性子のスペクトルが記載してございますけれども、このように照射中性子と同時期に核分裂中性子が出てきますので、これは照射中性子が圧倒的に多いので測定できないという問題があります。つまり、そのまま高速中性子を使うだけではアクティブ中性子法としては

核物質を測定できないということです。

続きまして、7 ページ目に進めさせていただきます。

つまり、高速中性子によるアクティブ法を実現するためには、照射中性子と核分裂中性子の識別法を新たに確立する必要があるということです。このため、我々は照射中性子が1 個ずつ放出されるのに対し、核分裂中性子は複数個が同時に放出されますので、これを利用することにいたしました。左は複数個の検出器を使うものですが、左下に照射中性子の場合は記載しております。照射中性子の場合は1 個ずつ放出されますので、どちらか1 台が検出されます。つまり二つの検出器を用いた場合、一つの検出器が検出され、もう一つが未検出の場合に照射中性子。右側の場合のように、二つの検出器が同時に検出すれば、これは核分裂中性子であると。これで区別することができるのではないかと考えられます。

しかし、実際にこれを区別するためには新たな課題が生じます。

8 ページに進めさせていただきます。

一つは、クロストークイベントを判別する必要があるということです。左は同じ核分裂中性子の検出図ですが、右側にクロストークの図が描いてございます。クロストークとは、一つの検出器で飛行された中性子がもう一つの検出器に入るものです。これも検出器が二つ検出しますので、二つの検出器が検出されているということで区別できないんですけれども、左の核物質中性子とクロストークの違いは、左の核物質中性子がほぼ同時に放出されますので、ほぼ同時に検出される。一方で、右側のクロストークの方は検出器間を中性子が飛行する時間がございまして、これは体系にもよりますが、数十ナノは掛かります。つまり数十ナノ遅れて検出されるということです。つまり、数十ナノ程度で判定ができれば、こちらの区別ができるんですけれども、これは従来の1, 000 倍程度速い測定となりますので、この速い時間分解能を持つシンチレータの検出器を利用することにいたしました。

ただ、シンチレータ系の検出器を利用いたしますと、御存じのように、シンチレータはガンマ線に感度がございまして、中性子とガンマ線の判別をする必要があります。それとまた、デブリからは非常に強いガンマ線が出ておりますので、その高イベントレートに対応する必要があります。まず、中性子とガンマ線の弁別につきましては、波形弁別(PSD)によってガンマ線を取り除く。

また、強いガンマ線源に対処するために、これは下に図が示してございますけれども、従来よく一般的に行われている手法といたしましては、検出器から得られるデータ、これにはガンマ線と中性子のデータが含まれておりますけれども、これを一度に取り込んで、その後

で PSD を掛けるという方が一般的によく使われておりますけれども、右側のようにこちらは核物理実験などで行われている手法ですけれども、検出器のすぐ後で PSD を掛けることによって、中性子だけのデータを取り出すことでデータ量を減らして、処理可能とする。こういったように処理を上流で波形弁別することなどで対処しております。

9 ページ目に示してございますのが、我々が開発した高速中性子を利用したアクティブ中性子法です。これは高速核分裂中性子の同時計数法と呼んでおりますが、これは *Fast Fission neutron Coincidence Counting* ということ、FFCC 法と呼んでおります。左に先ほどの主な影響因子が示してございますけれども、まず、中性子吸収材に対しましては高速中性子を使うことにより影響が小さいということです。また、大量のガンマ線に対しましては鉛遮蔽を併用することと、先ほど説明いたしました検出器上流での波形弁別によって大幅に低減することができます。また、新しい燃料と古い燃料が混在しており、核分裂生成物が抜けているという問題に対しましては、これは核物質を直接測定いたしますので影響が小さいといえます。また、非均質で様々な内容物があり、サイズが大きいという問題に対しましては、透過力の高い高速中性子を利用しますので、影響が小さいということでもあります。

左下に FFCC 法のスペクトルを示してございますけれども、こちらは横軸が検出時刻の差として、縦軸がイベントとなっています。右の図に検出体系が書いてございますけれども、核分裂中性子は先ほど説明いたしましたようにほぼ同時に検出されますので、中央にゼロナノ秒で核分裂中性子が集まるに対し、照射中性子がクロストークして検出されるイベントに対しましては、飛行時間期だけ離れて、これは数十ナノ秒程度ですけれども、離れた位置にピークをつくりますので、これによって核分裂中性子と照射中性子を区別することができるということです。

10 ページ目に進ませていただきます。

10 ページ目には、従来の手法と新しい手法の比較をしてございます。

まず初めに、照射する中性子でございますけれども、従来法は熱中性子であり、これは高速中性子と比べると透過力は低いと言えます。新手法は高速中性子で透過力が高く、また、中性子吸収材の影響に対しましては、従来法は例えばボロン-10 の (n, α) 反応の断面積は 3,800 バーンと大きいんですけれども、新手法では (n, α) 反応は 1 バーン以下と非常に小さくなっております。また、照射中性子と核分裂中性子の区別は、核分裂中性子の発生が遅れを利用して区別しておりましたが、新しい手法では二つ以上の検出器の同時計数で

区別いたします。検出器は従来法は計測のヘリウム-3 検出器を用いておりましたが、新手法では高速で動作する液体シンチレータを用いています。測定対象といたしましては、吸収材がない場合に限ったものですが、新手法では吸収材が混ざっていても測定可能となっております。

次に、11 ページに進ませていただきます。

11 ページからは、従来法と F F C C 法ということで、まず実験について説明させていただきます。従来法と F F C C 法との比較ということで、12 ページにその試料を示してございます。

測定条件の試料ですけれども、ウラン 84 グラムを用いました。これはウラン-235 が 3.4 % 同位体濃縮されているものです。中性子吸収材といたしましては B_4C を 125 グラム、これをケース 1 からケース 4 まで、ウランがあるものとならないものと、中性子吸収材がないものとあるもので、4 パターンの測定をしています。

右の写真はケース 3 のものですが、これはウランと中性子吸収材のどちらもあるものです。中央のシルバーの試料、五つ見えておりますのがウラン試料で、その周りの黒いものが中性子吸収材の B_4C となっております。これは写真撮影のために上蓋を開けておりますけれども、実際の測定の際には下の図に示してございますように、中性子吸収材全て覆って実験を行っております。測定時間は 20 分で、測定施設としては原子力機構 原子力科学研究所の B E C K Y において行っております。これは従来法と F F C C 法の全く同じ試料の測定を行いました。

次に、13 ページに、装置が示してございます。

まず、上が従来法、D D A 法の装置ですけれども、これはフルスペックの装置となっております。大きさは縦横 1.9 メートルで、高さが 2.1 メートルとなっております。検出器はヘリウム-3 検出器を使っております。こちらは中性子吸収材がない場合にはドラム缶中の数十ミリグラムのウラン-235 まで測定することが可能なものとなっております。

一方、新手法の F F C C 法は簡易的な原理実証体系となっております。左下に原理実証体系の写真が示してございますけれども、小さな液体シンチレータ二つ並べたものでございまして、大きさとしては縦横が 70 センチ程度、高さが 50 センチ程度となっております。検出器としては液体シンチレータ、E J 301、こちらは二台並べたものとなっております。こちらで比較を行いました。

14 ページが、まず従来法の実験結果を示しております。左の図が、中性子吸収材がない

場合の図を示しておりますけれども、ウランがないものが青、ウランを含むものはオレンジと示しております、ウランがない場合には照射中性子のみが観測されておりますけれども、ウランがある場合には核分裂中性子が観測されております、この核分裂中性子からウラン量を測定することができます。

一方で、右に中性子吸収材がある場合を示しておりますけれども、こちらはウランのありなしにかかわらず、照射中性子のみが観測されております。つまり、核分裂中性子が観測されませんので、測定することができないということで、従来法はやはり中性子吸収材が含まれていると核分裂の検出が困難ということが分かります。

次に、15ページですけれども、15ページが新しいFFCC法での実験結果となっております。

左に中性子吸収材がない場合、右に中性子吸収材がある場合が書いてございますけれども、ウランありがオレンジ、ウランなしが青となっております、真ん中に核分裂中性子がどちらも観測されています。つまり、非常に簡易的な体系ではあるんですけれども、簡易的でも従来法では不可能だった中性子吸収材を含むウランを検討できるということを示しております。

次に、16ページに進ませていただきます。

16ページ、こちらはFFCC法で核分裂中性子が観測されたわけですが、正しくそれが本当に観測されているのかというところを見るために、ウラン量を変えた実験を行っております。左の上の図でブランクというのは全くウランがないウラン量が0グラムですけれども、28と56、84グラムとウラン量を変えた測定を行っております。その下が積分範囲で核分裂中性子があると思われる範囲を示したものでございますが、こちらを積分して核分裂中性子を求めたのが右の上の図でございます。こちらのようにウラン量が変わる、増加するに従って核分裂中性子がきれいに線形に増加しておりますので、つまりこれは少量でも定量的な分析が可能であり、ちゃんと核分裂中性子を捉えているということと、簡易的な体系でも正しい結果が得られるということを示しております。

次に、17ページに進ませていただきます。

17ページから次はシミュレーションに移させていただきます。

18ページに示しておりますのが、まずはシミュレーションの信頼性確認です。シミュレーションですけれども、こちらは実験との比較となっております、こちらはシミュレーションの信頼性を確認するために、シミュレーションと実験で全く同じ体系を構築して比較し

たものでございます。これは実験の一例ですけれども、実験が青で、シミュレーションがオレンジで示しております。横軸が検出時刻の差で、縦軸がイベント数となっております、こちらは条件といたしましては、ウラン量は先ほどと同じ84.7グラムなんですけれども、シンチレータをちょっと強化しております、5インチ掛ける5インチを4台使ったものです。検出器の体系を增強しておりますので、核分裂中性子をより鮮明に見ることができます。隣に照射中性子が見えておりまして、あと実験とシミュレーションで線形の一致がかなりよく、つまりシミュレーションの信頼性が高いということがこれで確認できました。

次に、19ページに進ませていただきます。

シミュレーションの信頼性が高いということが分かりましたので、シミュレーションで従来法と新手法の比較をすることにいたしました。左が従来法の計算体系ですけれども、ヘリウム-3検出器を用いております、その周りにカドミウムとポリエチレン、内側に炭化ホウ素が入っております。中性子発生管が青で示しております、その内側にユニット缶と呼んでいるデブリを含む、高さが20センチ、直径が21センチのものにデブリを入れております。

右が新手法の計算体系でございますけれども、中性子発生管が左下にあり、中性子遮蔽と鉛の遮蔽がございます。上下に中性子検出器といたしましてシンチレータを配置したものでございます。こちらの計算のシミュレーションはPHITSとMVPを使用したもので、こちらは基本性能を確認するための計算でございますので、まだ最適化された体系ではございません。

こちら20ページが断面図でございますけれども、こちらのようにガンマ線遮蔽の中にユニット缶、こちらはDDA法のユニット缶と全く同じものですけれども、こちらが入っております。

21ページに、シミュレーションで想定しました試料、まずAとして例が示されています。こちらはウランとジルコニウムを主に含むものですけれども、ウランとジルコニウムの量を例えばユニット缶に15ボル・パーセント、つまりこれはウラン量は大体9キログラムを含むものですけれども、そちらとか、あと30ボル・パーセントに変えたり、6ボル・パーセントに変えたりしています。あとアクティブ中性子法に影響を与える影響因子の感度解析のパラメーターといたしましては、含水率として1ウェイト・パーセントから0.1ウェイト・パーセント、70ボル・パーセントまで変えております。

あと燃焼度といたしましては、平均燃焼度で23ギガワット・デー・パー・トンから低燃

焼度といたしまして1.3と、高燃焼度といたしまして5.1まで変化させております。中性子吸収材といたしましては、ガドリニウムと B_4C を考えておりまして、3ボル・パーセントや0.5ボル・パーセントから10ボル・パーセントまで変化させております。

続きまして、22ページでございます。

こちらは先ほどのウランとジルコニウムに、SUSとコンクリートを加えたものになってございます。こちらはケースといたしましてはSUS 7.2ボル・パーセント、コンクリートが25ボル・パーセントですけれども、こちらにコンクリートを50ボル・パーセントに変えたもの。含水率は1ウェイト・パーセントと固定してございますけれども、燃焼度は2.3から、低燃焼では1.3と、高燃焼度で5.1、また中性子吸収材は先ほどと同じように、ガドリニウムは3ボル・パーセントから30ボル・パーセント、 B_4C は0.51から10ボル・パーセントまで変化させております。

続きまして、23ページですけれども、こちらはウラン量が少なく、SUSがやや含まれているものです。ウラン量といたしましては0.075ボル・パーセントで、SUSとしては15ボル・パーセントから44から45ボル・パーセントまで変化させております。下に示してございますのが、シミュレーションで得られたスペクトルの例でございますけれども、左下が従来法のスペクトルで、A-1を計算した場合に得られるスペクトルでございます。右側がFFCC法で得られるスペクトルケースというのも、先ほども示しておりますとおり、左側の図では照射中性子と核分裂中性子、FFCC法のスペクトルでも真ん中に核分裂中性子と照射中性子が観測されております。

24ページですけれども、最初にDDA法の結果について説明させていただきます。

こちらの解析条件ですけれども、測定時間として10分間を想定しておりまして、また、中性子束としては10の7乗ニュートロン・パー・セックを考えています。また、A-1を基準としたもので、A-1と比べたばらつきを見たものです。左の図は横軸が核分裂性物質で、これを真値としてます、シミュレーションですので与えた量が分かるんですけれども、そのシミュレーションで与えたものを真値として、計算で得られたものが縦軸となっておりまして、オレンジ色が等倍となっておりまして、この等倍に近ければ近いほど精度が高いということが言えます。緑色は10倍と10分の1倍となっております。こちらを見ていただきますと、やはりガドリニウムとかホウ素などを含むものが下に出ておりまして、こちらはシミュレーションですのでこの値が出てくるんですけれども、この赤線で囲んだところは測定困難と書いてございますが、これは実際の測定ではバックグラウンドなどがあるので、こ

の辺は測定困難だろうと思われるところです。

次に、25ページに、FFCC法の結果を示してございます。解析条件は同じで、10分間で、10の7乗ニュートロン・パー・セックです。横軸は核燃料物質質量でございまして、縦軸が計算値となっております。こちらもおレンジ色が等倍に近くなって、精度がよいということですが、御覧いただくとお分かりいただけたと思いますが、DDA法と比べましてFFCC法の方が大分等倍の方に近く、つまり精度が高いということが言えます。

また、我々はこの補正の検討を行っておりまして、高精度化を行ってきております。それにつきまして、一つ26ページに、中性子消滅時間を利用した補正について説明させていただきます。

この中性子消滅時間というのは、FFCC法の装置で取得可能であるということが分かっているんですけれども、左のグラフが中性子消滅時間を示すものでございまして、この核分裂中性子が消えるまでのe分の1になるまでの時間が、中性子消滅時間と呼んでおります。こちら赤がA-14、こちらは水分が70ボル・パーセント含まれるもので、B-6というのはコンクリートが50ボル・パーセント、つまり水分とかコンクリートが多く含まれるものに対しましては、中性子消滅時間が長くなっておりまして、一方でガドリニウム、B-12と書かれているものはガドリニウム、中性子吸収材が入っているものですが、こういったものは消滅時間が短くなるという傾向があります。こちらは右上の表が、実際に中性子消滅時間をまとめたものなんですけれども、A-14では70ボル・パーセント水が入るものに対しましては、消滅時間は41マイクロ・セックで、50ボル・パーセントコンクリートが入っているものに対しましては消滅時間が20マイクロ・セック程度、そのほかは10マイクロ・セック程度となっておりまして、水分とかコンクリートが多くなっているほどこの消滅時間が長くなっているということを利用して、この性質を利用した補正の方を検討しております。

27ページ目に示してございますが、それらの補正を適用したものです。

こちらは中性子消滅時間のほかに、全高速中性子数とか、検量線による簡易補正を適用したものですけれども、前にお示いたしましたものと比べて、つまり補正前と比べまして、等倍、おレンジ色のところに近くなっておりまして、精度が上がっているということがお分かりいただけたと思います。また、こちらは今回検討したケースが高精度化されるようにパラメーターにしておりますので、今後パラメーターを振っていけば、これらの精度が悪化するという可能性はあるんですけれども、補正によって精度が向上するということと言えます。

考えております。

最後、28ページ目に、まとめさせていただきます。

まず、高速中性子と同時計数法を利用した新手法を開発いたしました。また、FFCC法は従来法では測定が困難であった試料でも適用可能であり、シミュレーションによってFFCC法が従来法に比べて大幅に高精度な測定を実現できることを明らかにいたしました。

今後は、福島第一原子力発電所の燃料デブリ本格取り出し時の核物質の測定のほか、これは中性子吸収材によって隠匿されている核物質の検知などにも使えると考えておりますので、そういった分野、つまり核セキュリティ分野の応用もできるのではないかと考えております。

以上です。

(上坂委員長) 藤様、御説明ありがとうございます。

それでは、今の御説明に対しまして、40分間をめどに質疑を行いたいと思います。

直井委員からお願いいたします。

(直井委員) 藤さん、御説明ありがとうございました。

福島の燃料デブリを非破壊計測で測定することは大変難しく、今まで大型の加速器で発生させた中性子を使ったNRTAをベースにしたタイム・オブ・フライト装置での提案が、10年ほど前にJAEAさんと、それからEC-JRCですね、欧州委員会の共同研究センターとの共同研究成果でなされました。ただ、これはかなり大規模な装置を要する、実際に福島のデブリに適用することは困難な装置でした。今回開発された技術は非常にコンパクトで、想定される測定時間も短くて、それから実際の適用の可能性が非常に高い技術であるというふうに思います。

それで、デブリ測定を目的として、この中には入っていなかったんですけども、やはりIAEAの保障措置対応で、どれだけの核分裂性の核物質がこのデブリの中に含まれるか。これを定量するということが非常に重要だというふうに思うんですけども、現状はこのような核分裂する核物質量を測定する手法ではないということで、今後この技術を保障措置に生かすためにはどのようなことをお考えかを教えていただけますでしょうか。

(藤グループリーダー) 御質問ありがとうございます。

御指摘のように現在の手法では、ウラン-238を主に測定する手法となっておりまして、このままではやはりウラン-235などを測定することは難しいと。ですので、これらの手法と、例えば今回はDDA法は使えないというふうに書いてございますけれども、実際デブリには中性子吸収材が入っていないものも多くあるだろうということで、こういったD

D A法と組み合わせて、いろんな手法と組み合わせることでそういったウラン-235などの量を出せないかと考えております。

(直井委員) ありがとうございます。

この間、試験的に取り出したデブリの分析結果をJAEAさんが報告されたのを聞いてきたんですけども、2か所で取った核物質の組成がかなり近くて、比較的その比率を使うということも可能じゃないかなというふうな感じを受けました。

それから、保障措置のアプローチにつきましては、東電さんとIAEAと規制庁の今後の相談事になっていくんですけども、どんな技術を使って評価をするのか。それから、測定技術の精度ですとか信頼性を含めて、まずは東電さんと密に連携していただきたいというふうに思います。

私からは以上です。

(上坂委員長) それでは、吉橋委員、お願いします。

(吉橋委員) 藤様、中性子を用いた燃料デブリの非破壊分析について、御説明ありがとうございます。

今、直井委員からもありましたように、私の先日、最近取り出された燃料デブリの分析で、すかね、ガンマ線のスペクトルメトリーだとか、セムラーとか、Exxetaなどの結果を見て、すごく進んでいるなと思ったので、こういったものと今回の中性子を用いたものとうまく組み合わせたら、もっといい分析ができるのかなというのを感じながら聞かせていただいたのと、先ほどおっしゃっていたように、やはり熱中性子で計りやすいものを高速中性子で見られるものというのも大分違うかと思うので、そこも質問しようと思ったら、組み合わせるとおっしゃっていたので、そういうことをする必要があるなというふうに思いました。

実験結果とシミュレーション結果がとても一致しているということであったりだとか、定量的な評価もできるということですからすごくすばらしいなと思ったんですけども、少し気になったのは16ページ目の結果のこの定量評価をするところの差がかなり小さいような気がしていて、実際のデブリを計り出したときにほかの物質に埋もれてしまったりだとか、エラーということではないかと思うんですけども、そういったものに信号が隠れてしまったりというようなことも出てくるのかなと思うんですが、今回、シミュレーションをされていますが、そのシミュレーションで今回想定したようなものの模擬試料というのが、どういうふうに行えるのか存じ上げないんですけども、実験的にはそういったところを模擬的に評価する予定というのはございますでしょうか。

(藤グループリーダー) 御質問ありがとうございます。

確かに、16ページに示したのは、非常に簡易的な体系ですので核物質の量が非常に小さくなっておりますので、御存じのように検出効率の2乗で効いてまいりますので、非常に簡易的な体系では非常に少なくなってしまうと、18ページに示してございますけれども、これを4台に増やすだけでこれだけ核分裂中性子が出てくるということで、実際にはもっと周りに検出器を置きますので、そういう意味で核分裂中性子が周りからのイベントに隠れるというのはかなり抑えることができると考えております。

シミュレーションでは、先ほどお示しいたしましたけれども、例えばSUSですとか、コンクリを例えば50ボル・パーセント入れたりとか、ウランが0.075ボル・パーセントのようなところに50ボル・パーセントのSUSを入れたりとか、そういったものも行ってまいりますので、そういったものに対しては大きな影響はないというのは得られています。ただ、今後もっとケースを増やして、どれがどれだけ影響を与えるのかといったことは押さえていきたいと考えております。

(吉橋委員) ありがとうございます。大変期待しております。

この中性子の検出器の置き方といいますか、配置だったり、そういったところも検討課題かと思いますが、期待しております。ありがとうございます。

私からは以上です。

(上坂委員長) それでは、参与からも御質問や御意見を伺いたいと思います。

青砥参与から御意見を頂ければと思いますが、聞こえますか。

(青砥参与) 聞こえております。私の声も聞こえておりますでしょうか。

(上坂委員長) 聞こえております。よろしくお願いします。

(青砥参与) はい。なかなか手応え感のある完成度の高い報告をありがとうございます。

直井委員や吉橋委員が色々気にされているように、ここまで作られてきていますので、実際に使うときにどういう課題があるかがやはり興味のあるところですね。私の方からは、16ページに出されているような最終的に定量性を出す、ウラン量を出す核分裂中性子との母線、評価線といったらいいのでしょうか、これは、今後、実際に適用に当たって新たに作るものなのでしょうか。その場合、どういう策定をされるのかがよく理解できなかったのですが、その辺りについて少しお話ししたい。もし仮にそこに課題があるのであれば、それについても教えていただきたいと思います。

私からは以上です。

(藤グループリーダー) 御質問ありがとうございます。

16ページの右上は、検量線と呼んでおりますけれども、こちらはウラン量に対する核分裂中性子数でございます、御指摘のようにこちらは体系によって変わってまいります。つまり、新しく体系を組むとこの量は変わってまいりますので、実際に近いものを作ったときには取り直す必要がございます、そのウラン量に対する核分裂中性子の量から計量することになります。ただ、この量というのは内容物に余り依存しないというのを確かめるためのシミュレーションが21ページから、22ページ、23ページに示してございますように、いろんなものを加えても相関が変わらないということを確認した上で、その検量線を使って定量するということになります。

以上です。

(青砥参与) その辺りについてはあらかじめ確認されていると思ってよろしいでしょうか。

(藤グループリーダー) その説明が忘れていました。申し訳ございません。

そちらは確かに実験的にも確かめる必要があると考えておまして、これから実験でもシミュレーションでも確かめていく予定です。

(青砥参与) ありがとうございます。そういった課題もあって、その上で今後ますます完成度を高くしていただきたいと思います。

(上坂委員長) それでは、岡嶋参与から御意見を頂ければと思います。

(岡嶋参与) 藤さん、どうも御説明ありがとうございました。

デブリの定量管理という観点で、非常に重要な技術かと思います。そのためにもやはり実用化ということが大事だと思って聞いていました。今回の話は、理想化を御説明された実験で、もともと測定手法の検討が行われて、測定に利用する速中性子として、早い炉内核燃料物質による核分裂中性子に着目した測定方法に対し2つ以上の検出器の同時計数から源中性子と核分裂による中性子を区別する方法を考案して、その実証を目的とした実験を行い、その実験のシミュレーションをやって、うまくシミュレーションが可能であるという確認の後、色々条件を検討されていると私は理解しました。

これからそういう点でまだまだ、もうちょっと検出器の配置とか、本数とかそういうものを色々検討されていって、最終的なものが出来上がったあとで、先ほどおっしゃったような検量線のようなものを全部測定をして、いよいよ製品化みたいなイメージになるのかと理解します。ここの計算の中でちょっと気になっていたのが、例えば燃焼度が書かれているのですが、この燃焼度とおっしゃっているのは組成的にはどういう形のものを与えられているので

しょうか。たとえば、単純にウランー 2 3 5 と 2 3 8 の比率だけなのか、あるいはその中に他の核種も考慮した燃焼を計算した結果から定量的に評価した中でウラン量を評価したものなのか。その辺を教えてくださいたいと思います。

(藤グループリーダー) 御質問ありがとうございます。

そこの説明が抜けておりますので、失礼いたしました。

こちら燃焼度と申しますのは、こちらは燃焼計算を行っておりまして、2 3 ギガワット・デー・パー・トンというのはウランー 2 3 8 と 2 3 5 の比だけではなくて、そのフィッション・プロダクトとか、全てのものが含まれているということです。しかも、これまで取り出されてきたデブリではフィッション・プロダクトが抜けているというような実態があるんですけれども、抜けていないという保守的な仮定で計算しています。

(岡嶋参与) 分かりました。

ということは、かなり現実的な組成を基にした計算結果で、それをまとめたものになっているという理解でいいわけですね。

(藤グループリーダー) そうです。

(岡嶋参与) ありがとうございます。是非その辺のところをもう少し詰めて、最適な体系なものを組み上げていただければいいかなと思いますので、期待していますので、よろしくをお願いしたいと思います。

私からは以上です。

(上坂委員長) それでは、小笠原参与から御意見を頂ければと思います。

(小笠原参与) どうもありがとうございます。

今回の研究成果ですけれども、資料の 2 4 ページの表と、それから 2 7 ページの表を拝見しても、明らかに実験の精度に高まりが見られます。研究の成果を上げられたことに対して、まずは敬意を表したいと思います。

デブリの取り出しは、廃炉の過程で非常に重要なポイントですので、この研究の成果が実際の廃炉の作業の中で、ほかのステークホルダーとしっかり連携して、有用に活用されていくことを期待したいと思います。

私からは以上です。

(上坂委員長) それでは、上坂から意見を述べさせていただきます。

まず、基礎的なところから確認させていただきたいんですが、まず 9 ページでして。これは F F C C 法の測定原理の図です。左にあるパルスですね、照射中性子二つ。それから核分

裂中性子と。あと右側の中性子源とデブリ試料、検出器があります。照射中性子、核分裂中性子の三つはこの右の図のどの中性子に対応しているのか教えてください。

(藤グループリーダー) はい。説明させていただきます。

まず、スペクトルの真ん中にあるオレンジ色に示してございますのは核分裂中性子になっておりまして、こちらは右の図でいいますと、検出器にどちらとも同時に核分裂中性子が入った場合、つまりどちらもほぼ同時に入りますので、検出の差がほとんどない。ゼロ秒のところに集まってまいります。

照射中性子は、この右側の方ですけども、こちらは上側の検出器をAといたしまして、例えば下の検出器をBといたしますと、このAを基準とした場合に、Aに入ってからBに入る、プラス側に飛行時間が掛かりますので右側に出てくる。逆にBに入って、Aに入ると、今度はAより早く入っていますのでマイナス側に出てくるということで、Aから入るか、Bから入るかによって左か右かに出てくるということになります。

(上坂委員長) これ検出器は二つですよ。それで同時計測していますよね。その合計がこれですよ。

(藤グループリーダー) はい。

(上坂委員長) そうすると、左が、これ短い距離を通ってきたものですよ。左が早い時間の方ですよ。

(藤グループリーダー) 早い時間を書いています。先にBに入って、Aに入ります。

(上坂委員長) それで、右のパルスが、今度この図でいけばBに入って、Aに入った。

(藤グループリーダー) 右側の山の方は、Aに入って、Bに入る。

(上坂委員長) 下がBでしたっけ。

(藤グループリーダー) そうです。下がBです。上の検出器をAとして、下の検出器をBとしますと、Aから入ってBに行くのが右側に出て……

(上坂委員長) この二つのパルスは同じく直接来るものと。AからB、BからAというのはほぼ同じ時刻に到達するという過程でよろしいのですか。

(藤グループリーダー) そうです。

(上坂委員長) 二つのものが重なっているという感じですね。

(藤グループリーダー) そうです。

(上坂委員長) 分かりました。

それから、12ページです。これも実験体系で、ウラン有無は分かります。ウランは、円

筒形のサンプルで、84グラムというのは、全部で84なんですか。それとも一個一個が84なんですか。

(藤グループリーダー) 全部で84グラムになっております。

(上坂委員長) これも均等にということで、同じものが入っているということですね。

(藤グループリーダー) はい、そうです。

(上坂委員長) 分かりました。

次に、16ページです。FFCC法の測定の最新の実績があります。ここで先ほど来お話がありましたように、今回測定したウランの量は84、56、28グラムであるということでもあります。ただ、先ほどお話しになりました試験取り出しでここまで2回で出てきたものは、新聞等々で見ると5ミリ程度ということになります。そういうのが当然いっぱい今後出てくるとなると、かなり一個当たりのデブリの中にある量は小さい。それこそミリグラムであると思うのです。今後、体系によるとの御説明がありましたが、測定精度を考えたとき、量の検出限界を上げるには中性子源を増やしていくのか、それとも検出器を増やしていくのか、感度を上げていくのか、背景をどうするのか。どういう感じになっていくのでしょうか。

(藤グループリーダー) 御質問ありがとうございます。

やはり検出限界を上げるのは御指摘のように、中性子源ですとか配置ですね、直接入るのを減らして、コインシデンスを増やすというのと、あと検出器の効率を上げるということがありまして、それは例えば検出効率を上げようとする、シングルとコインシデンスの比が悪くなったりしますので、バランスを見ながら、今後最適化して上げていくということです。

(上坂委員長) 分かりました。

というのは、昨年、ミュオンでも同様にデブリの中のウラン計測のシミュレーション、計算結果だったのですけれども、それは1キログラム程度。これから開発の余地があるかなというふうなことで、ちょっと御質問させていただきました。

次です。現在、2回の試験取り出しでの最大5ミリ程度の燃料デブリの総合的に内部組成分析が、今数個の研究所で行われております。そこではエックス線CT等色々な方法で確かめられています。非破壊検査ではよくあることですが、このアクティブ中性子法を含めて可能性のある手法を実施して、並行してやって、そしてウランが含まれていると疑われるものは核物質保管施設に入れる。ないと判定したものは放射性廃棄物保管施設に仕分するということが必要だと思うのです。この辺りの戦略はいかがでしょうか。

(藤グループリーダー) ありがとうございます。

我々も、この話でもちょっと触れさせていただいたんですけれども、この手法というのは核物質を測定する手法ですけれども、やはりかさ密度ですとか、ガンマ線の強さですとか、そういったものも測定する必要があると考えてございますので、エックス線CTとか、そういったものと組み合わせて使っていきたいと考えています。

(上坂委員長) それから、これは先ほど来の質問にもあったんですが、保障措置的にはウラン-235の濃度も欲しいということです。水や中性子吸収材に強いこのFFCC法は、対象はウラン-238になりますが、これでも十分使えますね。しかしながら、もちろん併用するというのももうお答えになっていたんですけれども。これは既に試験取り出しから出ているデブリの中で、組成がかなり似ているとか、そういう情報がありましたね。それから、ウラン-238と235の比、つまり燃焼度というのは、これは1、2、3号炉でかなり特徴があって、かつ場所によっても変わるでしょう。問題はその誤差も測定誤差に比べれば、埋もれる範囲かもしれないと。全て知らないものの情報を得るということではなくて、アприオリも使って、分からないところのみを詰めていくという戦略の方がいいと思うのです。1、2、3号基の事故がありましたが、それまでの燃焼の状況で、238が分かればある程度の誤差で235も分かるということはないでしょうか。

(藤グループリーダー) 御質問ありがとうございます。

私も、これまでの知見からある程度均一であり、測定の誤差に比べれば、235と238の比というのは、ほかの部分取り出しとかで決められると思っておりますので、そういった知見を踏まえながら使っていきたいと思います。

(上坂委員長) 是非様々な手法と、手法の精度を上げるのと、それから様々な手法との組合せと。そういう情報を使っていただいて、最適の解を作っていただきたいと思います。そして、今後検討が始まると思いますが、ウランが含まれていると思われるものは核物質保管施設、そうでないと思われるものは放射性廃棄物保管施設に仕分して、保管する設備や手間を最適化するというのも今後重要だと思います。是非その検討の方もよろしくお願いしたいと思っています。

それでは、どうも御説明ありがとうございました。

議題2は以上でございます。

では、説明者におかれましては御退席の方をお願いいたします。どうもありがとうございました。

(日本原子力研究開発機構 退室)

(上坂委員長) それでは、次に議題３について、事務局から説明をお願いいたします。

(井出参事官) 今後の会議予定について御案内いたします。

次回の定例会議につきましては、令和７年１０月７日火曜日、１４時から、場所は中央合同庁舎８号館６階６２３会議室にて行います。議題については調整中であり、原子力委員会ホームページなどによりお知らせいたします。

(上坂委員長) ありがとうございます。

それでは、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。どうもありがとうございました。

－了－