

高速炉開発会議戦略ワーキンググループ（第13回）

日時 平成30年10月17日（水）13：30～15：15

場所 経済産業省本館17階国際会議室

○村瀬部長

定刻になりましたので、ただいまから第13回の戦略ワーキンググループを開催させていただきますと思います。

本日は、ご多忙の中お集まりいただき、ありがとうございます。

それでは、早速、議事に入りたいと存じます。

本日の議題は、ナトリウム冷却高速炉以外の高速炉技術についてということで、株式会社日立製作所様、それから日立GEニュークリア・エナジー株式会社様及び東京大学、山脇名誉教授をお招きいたしまして、お話をいただきます。

日立様からは、「高速炉の新たな可能性について」ということで、同社で開発を進めておられる「軽水冷却高速炉」、それから「金属燃料ナトリウム冷却高速炉」につきまして、また、山脇先生からは、「熔融塩炉開発の世界の動向と日本の歩み」ということでお話をいただくということにさせていただきますと思います。よろしくお願い申し上げます。

それでは、早速お話をいただきたいと思いますが、カメラがあれば、ここまでとさせていただきます。

それでは、まず日立の武原執行役常務様から資料1を用いましてご説明をいただきたいと思っています。

それでは、武原様、よろしくお願いいたします。

○武原執行役常務

日立の武原でございます。本日はこのような貴重な説明の場をいただきまして、どうもありがとうございます。

今回は、日立の「高速炉の新たな可能性について」と題しまして、特に新型の高速炉についてご紹介させていただきたいと思っています。よろしくお願い致します。それでは、座らせていただいています。

お手元の資料、ページめくっていただきまして、3ページ目をごらんになっていただきたいと思っています。

3ページ目は、これは日立の原子力ビジョンと新型開発炉と書いてございますが、横軸に時間をとって、縦軸には、上段には大型炉、軽水炉のABWRを一番左側に置いた大型炉、それから下側には、1960年代にアメリカで開発されたEBRをベースにしたナトリウム型の、そういう炉の時代の流れを書かせていただいています。上が、ABWRにつきましては、ご承知のとおり、柏崎の6・7号機で開発させていただきまして、その後、浜岡、志賀ということで続いてございます。現在、建設中の島根3号機と大間がございますが、このうち大間の場合はフルMOXということで活用を考えてございます。

今回ご紹介させていただきますのは、この大間のフルMOXの流れを、軽水炉の技術を使って高速炉の特性を持つものをつくろうということで、RBWRという炉型を紹介させていただきたいと思っております。これは、プルトニウムの燃焼とか有害度の低減というのを目指してございまして、これは2050年代に何とかしたいということでやっているものでございます。

下段は、兄弟会社のGEと一緒に開発しているのがございまして、間にあるBWRX-300というのは軽水炉の小型炉ということでございまして、これは経済性を追求したものでございます。これは2030年ぐらいを目指しています。

その下の段にあるのが、今回ご紹介させていただきたいPRISMというものでございまして、これは金属燃料のナトリウム冷却炉でございます。これはEBRと書いてございますが、これはアルゴンヌのナショナルラボラトリーで開発していたものでございまして、日米共同開発で先に進めたいというふうに考えてございます。

本日は、このうちのRBWRとPRISMにつき、ご紹介をさせていただきたいと思っております。

では、4ページ目をごらんになっていただきたいと思います。

4ページ目は、先ほど申しましたRBWRとPRISMについての補足の説明でございます。上のほうに表がございますように、これから2050年まではプルトニウムの削減・有効利用するということで、具体的な対策は、実績ある軽水炉の技術をベースに新しい技術を適用していかうとしていきます。具体的には、フルMOX-ABWRの後にRBWRの部分適用と書いてございますが、既設へのバックフィット型のようなものを考えております。そのベースで、2050年以降には使用済みMOX燃料の蓄積ということも考えまして、RBWRの本格適用、あるいはPRISMという炉型を活用したいと思っております。下にありますRBWRは軽水炉の高度化のようなもの、それから、右側のPRISMは、米国・アルゴンヌナショナルラボラトリーとのコラボレーションで今後、具体化をしたいと思っております。

では、続きましてRBWRについてご紹介させていただきたいと思っております。

5ページを飛んで、6ページ目をごらんになっていただきたいと思います。

6ページ目には、これはABWRで大間で採用しようとしていますフルMOXのABWRの炉心部の特徴を書かせていただいております。BWRは、全炉心に満遍なく制御棒を配置できるという特徴がございますので、十分な炉停止余裕を持てるということで、大間では全炉心にMOX燃料、プルトニウムを含んだMOX燃料を全面的に装荷するというところで考えてございます。

7ページ目は、この進化ということで書かせていただいております。

7ページ目の上のほうに書いてございますのはBWRの特徴でございます。沸騰水型原子炉の場合は、沸騰しているボイドの多い少ないということで、減速材である水の割合を変えるということが出来ますので、これを使って水の割合を減らすことによって中性子を高速化できるという特徴がございます。こういうものを使って、プルトニウムとか、それからTRUを燃焼すると、そういうことをやろうということでやっております。

特徴は、下に書いてございますように、冷却材が軽水ということで、取り扱い実績が非常に多い。それから、負のボイド係数が維持できる。それから、水と燃料の比を調整することによって、高いプルトニウム転換率を実現できると。それからあと、使用済みMOX燃料中の核分裂性プルトニウムを再利用に適した組成にするということを組み合わせることで、マルチサイクルが実現できるという可能性を持っております。

8ページ目にいただきたいと思います。これは、フルMOX-ABWRからRBWRへの進化ということで書かせていただいておりますが、上の右側にありますのが、現行のBWRの燃料の断面を書いてございます。ここにございますように、155ミリ角のところに、この場合は10×10の燃料なんです。水と燃料が大体3対1ぐらいで入っています。高さ4メートルということでございます。今回ご紹介しますRBWRは、下にございますし、その横に炉心の形がございまして、これを稠密の燃料構造にしまして、燃料棒をかなりたくさん入れるということで、水と燃料を、この場合は397本の燃料なんです。水と燃料の比を1.4対1にするということで、水が少ない、そういう炉心にするということでございます。

次のページには、ここまで行くためにどういう手順をとろうかということで考えている内容を紹介させていただきます。

9ページ、下の左側にありますのが、BWRの燃料と、プルスーマルと、MOX燃料でございます。現行は8×8で60本入っているものを、これをだんだん進化させて、10×10とか、そういうことで、高燃焼度化を目指したいと思っておりますが、その上のほうにありますRBWR243燃料と書いてございますのは、これは既存のBWRのような四角形の燃料で、燃料集合体の燃料棒の

密度を上げるということで、このプルトニウムの装荷量を上げたいということを考えてございます。この上に行きますと、既存の再処理工場とかMOX加工技術からちょっと少しジャンプアップすることになるんですが、新しい形のRBWR397になりますと、この場合は転換比をより高めることができるような、そういうことを考えてございます。

次の10ページは、今のことを絵で描かせていただいています。10ページ目は、横軸に水と燃料の体積比、縦軸にはプルトニウムの転換比を書かせていただいています。一番右側にございますように、現状の燃料は、燃料棒が60本あるいは92本というようなことでなっていますが、これを燃料棒を243本にしますと、大体1.4倍とか、そういう比になりまして、さらにこれを397燃料、あるいはもっとそれを上げることによって、転換比を上げることができるということになってございます。

11ページ目は、これまででどういうことをやっているかということを書かせていただいています。これは、この開発はオープンイノベーションということで、世界の研究機関、大学あるいはそういういろんな方の技術、アイデアを採用させていただきたいということでやってございます。これまでには、アメリカの3大学あるいは英国の研究所・大学といろんなことをやらせていただいていますし、日本も文科省さんのご支援をいただきまして、大学のほうと、あるいはJAEAさんといろんなことをやらせていただいています。今後これらをもう少し進化させていただきたいというふうに思っております。

以上がRBWRでございまして、12ページ以降はPRISMについてです。Power Reactor Innovative Small Moduleというふうに書いてございますが、これは我々の兄弟会社のGE社がアルゴンヌの研究をベースに開発を進めているものでございます。

13ページ目は、そのPRISMの概要を書かせていただいています。ここにあります米国のEBRというのは、これは先ほどから申し上げますような、アルゴンヌの研究開発で実際にデータをとって来た炉でございます。これをベースにGEがこのPRISMという炉を開発してございます。特徴は、ここにございますように、モジュール化をしています。それから、金属燃料を使っています。それから、受動的な安全性を担保できるということ、それから免振装置を採用などがございます。特徴はここに書いておりでございます。

それから、この特徴を少し模式化したのが14ページにございますので、ページをめくっていただきたいと思っております。

PRISMの受動安全システムと書いてございますが、①に書いてございますように、セラミックス系ではなくて、金属系の燃料を使っているということで、熱膨張が大きく、温度が上昇す

ると反応度がマイナスになります。それから、一次系のナトリウムの温度が上がると、これもナトリウムの膨張によって、このページで書いてございます左側の赤いところに、炉心と書いてあるところに温度が高いナトリウムがあるんですが、これが熱膨張によって周りの堰を越えて、空冷ができる領域に移動していくということで、これも受動的に安全が確保できると。そういうことで、受動的に、人が関与しなくても、自然に事故を収束できるというような、そういう安全性を持っているということでございます。

それから、15ページ目には、これは海外で何やったか、国内で何やったかをもう一遍おさらいさせていただいています。写真にありますように、米国の試験炉のEBR-IIという炉でございまして、これは1964年から長らくデータをとらせていただいているものでございます。94年には、NRCが概念設計を安全基準に照らして、適合しているという評価もいただいております。

これは最後のブレットにございますように、現在、アメリカのDOEが多目的試験炉、VTRということで、計画をしようとして進めていまして、現時点ではGE日立社がこういう案件に応募をしているということでございます。

国内は、アルゴンヌさんとそれから電中研さん、金属燃料の共同開発を実施されていますし、それから、金属のナトリウム高速炉につきましては、いろんな形で対応してございますが、2018年5月には開発機構さんでこういう研究もやるということで話をしているということで、昔やったのが今、大分、脚光を浴びてきているというふうには感じてございます。

16ページ目には、これを絵で模式化させていただいています。16ページに書いてございますように、EBR-IIというのは、64年から94年までいろんなデータをとったということでございます。PRISMについては、DOEさんのファンド、あるいはGEの自主開発ということでやってきたんですけれども、ここにございますように、DOEでいろいろ研究している延長線上として、2018年ぐらいから多目的試験炉をやるかということで動いたということでございます。

17ページ目には、これはアルゴンヌがやっているときに、EBR-IIと燃料サイクル施設を併設したということで、自己完結型の炉ということで、IFRという概念にしてございますので、このIFR、Integral Fast Reactorの概念図を紹介させていただいております。

最後、19ページ、まとめでございます。

我々は、19ページ、書いてございますように、運転実績豊富な軽水炉のABWRをベースに、フルMOXの延長線上から高度化をした稠密燃料を採用した軽水冷却高速炉、RBWRを開発していきたいと考えてございます。それから、もう一方、アメリカのEBRをベースにした小型モジュ

ール炉、PRISMというものを開発させていただきたいと考えてございます。ここに書いてございますように、これを通して、日英、プルトニウムの削減、あるいは将来の資源の持続性、有害度低減に貢献したいと思っております。

ここに最後に書いてございますように、今後の課題ということで、やはり日本のみならず、米英の国際協力の枠組み、そういうものがあればなと思っておりますし、産官学が利用できる研究インフラ設備をいただきたいなというふうに思っております。

以上、ご清聴ありがとうございました。

○村瀬部長

ありがとうございました。それでは、質疑応答に入らせていただきたいと思います。

松野課長、お願いします。

○松野課長

どうもありがとうございました。大変意欲的な、先進的な開発の動きをとっていただいているということがよくわかりました。

議論に入る前に、初歩的なところになってしまうかもしれませんが、1つ、11ページの海外との協力の中で、RBWRの動きをご紹介をいただいているページがありましたけれども、イギリスとアメリカと日本ということで、政府関係機関ともやっけていただいているというお話ありました。日立さんとしてももう少し具体的にどのような取り組みをやっけていただいているのか、お教えいただけるとありがたいなと思ったのが1点です。

もう一つは、今日、2つのタイプ的高速炉のお話をさせていただきましたけれども、これらタイプの違うものというのは、具体的に何か使い方としてどのような違いをイメージされていらっしゃるのか、されていらっしゃらないのか、活用のあり方の最終的な姿として、イメージが何か違いがあるのか、そのイメージの違いからこういうタイプの違いが出てきているのか、そのあたりをお教えいただければありがたいと思います。

○武原執行役常務

1点目はちょっと後ほど小澤のほうから技術的な説明を。

2点目のタイプが違うことにつきましては、かなり意識してございますのは、次世代にこの分野の人材をつなぎたいというのが非常にございまして、一つは、やっぱりMOXの延長線上ということで、軽水炉のほうから炉の燃料を開発することを中心にやっけていくということで、我々はもともとずっと日立の研究所でやっけていたというのがありますので、これを続けるということと、延長線上でやりたいということでございます。特に燃料とか炉心の特性とか、そう

いうところをです。

それから2点目のPRISMは、これは、ご承知のとおり、我々は「もんじゅ」にも参加させていただいて、ナトリウムの技術、いろいろやっておるんですが、アストリッドをやるということで、いろいろ主たるところは動いているんですが、我々としては、ありとあらゆる機会を使って、こういう技術と人材を維持したいと思っていますので、兄弟会社がこれをやるということであれば、ぜひともということで、人や技術を投入して、特に若い人間を派遣して、勉強したいというところから始まっているという背景がございます。いずれにしても、こういう実際のR&Dの場を通して、エンジニアとか研究者を維持するために使いたいということから始まってございます。たまたまなんですが、世界的な動きもこういうふうによりやく盛り上がってきたということで、今回こういうお話をさせていただいています。

では、1件目についてちょっと。

○小澤チーフプロジェクトマネージャー

小澤でございます。1件目の海外協力、アメリカとイギリスと、具体的な取り組みというご質問かと思しますので、少し説明させていただきます。

アメリカのほうは3大学との共同研究ということなんですけれども、もともと日立の中では結構長いことRBWRの開発をやってきました。この概念をアメリカの3大学に紹介をいたしまして、共同研究というものを始めたわけでございます。この3大学は、原子力の研究をずっとやってきてございまして、解析コードとか、いろんなインフラを持っていて、知見がございます。こういったアメリカの独特の独自の知見をもって、私たちの開発したRBWRの検証をやったということでございます。具体的には、炉心の成立性とか原子炉システムの安全性とかをアメリカの独自のコードで検証して、ある程度の成立性を見通しを得たということが主な取り組みでございます。

イギリスのほうは、ご承知のようにABWRの輸出を今頑張ってるというふうに考えておりますけれども、やはりイギリスの中でも人材育成を考えていかなければいけないということで、アカデミア、大学とかそういった研究機関と一緒にあって、将来のあり方というものを、このRBWRというものを使って一緒に研究していこう、勉強していこうという取り組みでございまして、これはまさにイギリスと一緒に始めたところでございます。こういった人材育成も含めて取り組んでいるところでございます。

以上でございます。

○松野課長

ありがとうございました。

イギリスの話で、ここに書いていただいているRBWRの適用シナリオを議論中というふうに書いていただいていますけれども、この適用シナリオというのはどういうものになるのでしょうか。

○小澤チーフプロジェクトマネージャー

引き続き説明させていただきます。

イギリスででき上がったこのABWRでございますけれども、先ほど申し上げましたように、既存のABWRの型式でも使えるような、稠密燃料の可能性というものを使って、イギリスの中でもプルトニウムを利用していくことができるのではないかと考えておりますので、そのような内容を開発といいますか、勉強していこうということを考えてございます。

○松野課長

ABWRの燃料については。

○武原執行役常務

今、イギリスのほうで許認可申請していますのはウランのABWRなんですが、こちらは、大間とほとんど同じハードを使いますので、MOX燃料を使い、フルMOXにし、その後は、さっき言った矩形の燃料みたいなものを入れてもう少し高度化できないとか、そういう可能性です。今はまだウランの燃料での申請になってございます。

○松野課長

ありがとうございます。

○村瀬部長

森中さん。

○森中原子力開発対策委員長

ご説明ありがとうございました。

2点ほど、ちょっと余りよくわかってないところがあるので教えていただきたいんですが、今の燃料の開発のところは9ページのところにございましたけれども、9ページのところで、特にこのRBWRの六角形のほうへ行くとき、その手前もそうかもしれませんが、これまでの開発の延長線上でできるのか、あるいはかなり違った実証とか、そういうものが要するのかというのがもしあれば教えていただきたいというのが1つ。

もう一つは、こういった炉ですので、今の軽水炉の安全基準がそのままというわけではないのは十分に承知しているんですけども、基本的なところで今、軽水炉の場合、今後出てくる

炉の場合でも、多分、前段否定とか、そういった基本的なところは余り変わらないような気がするんですけども、その辺についてももしお考えがあれば、この炉で対応できるのかどうかというのを、もしわかれば教えていただきたいと。2点です。

○小澤チーフプロジェクトマネージャー

ありがとうございます。小澤でございます。

燃料については、まず稠密燃料を使うというものと細い燃料を使う、それからプルトニウムを装荷するという事で違いがございますけれども、稠密、それから六角形というふうにステップアップしていく段階で、プルトニウムの装荷量とか、あるいはTRUをまぜていこうという事で、少しずつ炉心の特性が変わっていくのではないかなというふうに思っております。なので、少しステップアップしていく段階で、今の延長上にある四角い燃料であれば、少し抑えたようなスペックで、例えば既存の技術の延長線をフルに活用したものになっていくかなというふうに思います。それから、六角形のところは、かなりプルトニウムをふやしていくということになれば、炉心の特性が変わっていくので、それに合わせたような設計を取り込んでいくことになろうかと思っております。同時に、燃料サイクル側の工夫というものもあって、今の六ヶ所の再処理とかMOX燃料の設備で対応できる範囲というものがございますので、その範囲でできる場所。それから、その次の段階に進めば、もっと高度な燃料ができるのではないかなというふうに思っております。なので、必ず新しい燃料を入れるときには、照射とか先行導入してみるとか、いろんな確証試験というものが必要になってくるとは思いますが、そのステップについては恐らく今と同じではないかなというふうに思っております。

それから、2番目の安全基準については、RBWRの場合は、ABWRと同じプラントシステムを流用することを考えてございます。ですので、新しい安全基準でABWRが変わっていくとすれば、その変わった姿をRBWRにも適用していくことになろうかと思っております。特に、炉心が変わった部分も、炉心が変わったとしても、プラント側の影響があんまりないような設計から始めていくのかなというふうなイメージでございます。

以上でございます。

○森中原子力開発対策委員長

このPRISMのほうはまた全然別の概念でできているから、ちょっと今のルールの中ではなかなかすぐどんな対策がというところまで行かないと思っただけいいんでしょうか。

○武原執行役常務

PRISMは、ページで申し上げますと、15ページとか16ページにちょっと書かせていただいた

んですが、GEはかなりのレポートをつくってしまっていて、1994年にEBR-IIでのいろんなデータに基づいて、NRCが暫定的な評価をやっています。今のポスト福島のことを全部考慮する必要はありますが、当時の安全基準の基本的なところはクリアしているというところまでは見られていますので、我々はそれをベースに考えていくのかなというふうには今思っています。だから、NRCが今後VTRみたいなものを作って、いろいろやっていくとき、そういうところでチェックをしていただきながら、やらせていただきたいとは思っています。

○森中原子力開発対策委員長

わかりましたが、ポスト福島はまた別途、別だというご認識ですね。

○武原執行役常務

多分、NRCは、今やるのであれば、完全にテロとかポスト福島とか、当時と違う追加の仕様を要求するんじゃないかというふうに思います。

○村瀬部長

私のほうから、ちょっとプリミティブな話なので先にお伺いさせていただきますと、最初のところの3ページのところで、今後のビジョンということで書いていただいて、スケジュール感をお伺いしたいと思います。これを見ると、例えばPRISMだと、2050年代にマーケットインをするようなイメージで作業されているというふうに見えます。またRBWRだと、これも同様にやっぱり2050年代のようなイメージを持ちながら、今取り組まれているということという意味なんでしょうか。

○武原執行役常務

ええ。ハードルは高いんですが、できればそういう形でやりたいということで、マーケットインの定義が非常に難しいんですが、少なくとも商業炉ベースの実証が大体終わるぐらいにはしたいということでのイメージを持っています。

○村瀬部長

なるほど。わかりました。

そうなってくると、商業炉のイメージをこの時点では持っているということだと思んですが、商業性のある炉を開発するという観点で一番大きな課題となっている技術的ないわゆるポイントはどこにあるか。例えば、こういったたぐいの材料開発だとか、燃料をこういう形のものをやる上での燃料設計上のこういう課題とかいう、幾つもあると思うんですけども、このあたりが大きな課題になりそうだというのであれば、教えていただければと思います。

○武原執行役常務

先ほど来ご紹介させていただいていますように、一番キーになりますのは、燃料とかコア、炉心だと我々は理解しています。材料的にもそれなりにあまりジャンプアップしなければ、今のものを延長上でまず最初に使うということで考えているんですが、まずはやっぱり炉心がきちり安全な炉で、きちっと経済性がある炉をつくれるかというのがポイントかと思っ
ていて、特にコストパフォーマンスが出るかどうかというのは非常に大きく今後の我々の開発を左右するんじゃないかと思っ
ていますので、できるだけそんなにひどいお金にならないようにというのが、一番のポイントではないかなと思っ
てございます。特に燃料工場をつくるとか、いろんな形でお金が必要になる可能性がありますので、その辺はやっぱり留意する必要があるんじゃないかなというふうには思っ
てございます。

○村瀬部長

ありがとうございました。

小澤調整官。

○小澤調整官

ご説明ありがとうございました。

RBWRは、どちらかというと既存の技術的なものをベースにして、軽水炉の形からの応用で、大型・中型のものを想定しながらアプローチをしていくということかなと感じました。それから、もう一つは、PRISMのほうは概念が全く違うので、これはチャレンジングなところもあると思うんですけども、これはどちらかというと小型で、少し先を狙ってやるということのように理解いたしました。大体そういう理解でよろしいですね。

○武原執行役常務

はい。おっしゃるとおりです。ただ、PRISMについては、ベースとなっているのがアメリカの技術だということで、我々の兄弟会社も一生懸命やっているのはアメリカの技術なので、やっぱり特に国際的には日米の連携が必要ではないかなというふうには思っ
てございますというのが、特に大きく異なるかと思っ
ています。

○小澤調整官

その上で、PRISMのほうは、特に技術的な難しさというのはどこに感じていらっしゃるのかと。概念設計はおおむねいけるということですけども、その上でここはチャレンジングで、ここの技術的なところは難しい、それとももうおおむね解決していると思っ
たらいいのか、そこは何か特にございますでしょうか。

○武原執行役常務

一つは、ナショナルラボでつくった実験炉でございますので、これをきちっと30万kWくらいなんです、商業炉としてきちっと信頼性がある、安定した製品に仕上げられるだけの、実験炉じゃない、商業炉として成り立つだけの、ちゃんとしたメーカーの製品をつくって、なおかつそれが経済性があるというのが、チャレンジじゃないかなと思います。基本データはそろっていますので、あとは、ここにどれだけ安全強化をその後のことでやっていくかとか、そういうことかとは思っています。我々としては狙っているのはモジュールなので、できるだけ型式認定をとって、いろんなところに持っていけるようにしたいみたいなことを思っていますので、アメリカでうまくいった炉をできるだけこっちにもバックフィットしたいみたいな、そういうイメージでやらせていただきたいなと思っています。

○小澤調整官

安全系の技術のところが難しいのか、それとも、それぞれ燃料、コアのところが難しいのか、そこは何か。

○武原執行役常務

いや、安全系というよりも、やっぱりそういうものを製品にしたときに、きちっと本当にターゲットとなるようなコストパフォーマンスを出せるかというのが、高いものをつくって芸術的に仕上がりますよということになってないことを、我々はメーカーとしてやっぱり証明していかないといけないのかなというふうには思っています。

○松野課長

そういう議論の中、また初歩的な質問に戻っちゃうかもしれませんが、まずRBWRのほうなんですけれども、プラント設備はABWRの実績をそのまま流用可能と書いていただいているんですが、これは既存のABWRを余り改造せずに、そのまま燃料だけ取りかえればいいのか、もしくは改造が必要なのか、もしくは、改造ということではなくてまた一から、同じようなコンセプトなんだけれども、一から作らないといけないというものなのか、どうでしょうか。

○武原執行役常務

9ページにあるRBWR243燃料と書いてある、概念設計のものがあるんですが、これは矩形の燃料で、できる限りABWRの炉心に寄せられるようにしたいというふうに思っているんですが、多分、あと燃焼度その他とか、あと制御棒のワースとか、いろいろ細かいことかというと、ハードは見直さないといけないことはあると思うんですが、おおむねABWRにバックフィットしたいと思っていますので、部分的に使うとかいうのは、ぜひとも今のものので使えるような設計を燃料屋さんにやってほしいなというふうには思っています。

これは全炉心で入れてというと、ちょっといろいろまた大きな課題があるかもしれませんが、そういうところを延長線上にして全炉心で入れるのであれば、それに応じた少し変更を持った炉内の機器類なんかをつくる必要がある可能性もあります。いずれにしても、制御特性とか中性子の計測とか、その他もろもろは確実に少し見直さないといけないんじゃないかなというふうには思っています。

○松野課長

そういった研究をこれからされていくという。

○武原執行役常務

はい。

○松野課長

もう一つは、例えばプルを含めたTRUの燃焼とか、いわゆる高速炉としての機能の部分ですけども、これは議論されているナトリウム高速炉のようなものと比べて、何か違いといったものはあるということなんでしょうか。

○小澤チーフプロジェクトマネージャー

ナトリウム高速炉と軽水炉ということでございますけれども、やはり軽水炉ではなかなか飛び越えられないところがございまして、資料の中で転換比1と書かせていただいておりますけれども、今の見通しとしては、その辺が上限になるのかなというふうに思っております。

○松野課長

ありがとうございます。

○村瀬部長

加藤さん、お願いします。

○加藤事業部長

なかなか有意義な説明、ありがとうございました。幾つかご質問で、特に9ページとかで、概念的にはかなり稠密化を進めているという形になるのかなと。総体的に水の量が少なくなる傾向になると思うので、特に日本に適用する場合には、NRCというか、NRAの新規制基準に適合させる必要が出てくるわけで、そうすると、シビアアクシデント解析とか、いろいろな解析の中で、従来のABWR以上に厳しい結果が予想されるような気がするんですけども、そのあたりいかがお考えでしょうか。

○小澤チーフプロジェクトマネージャー

ご質問ありがとうございます。

まず、稠密にするところ、水の量が少ないということでございますけれども、プラントシステムとして、炉心がそのような冷却性能が達成できるようなことも考えてございまして、その上のページ、8ページ、ごらんになっていただきますと、稠密にすることによって少し燃料を短くするというので、燃料を狭くすると水がなかなか通りにくいということもございまして、その通りにくさを短くすることで何とか克服しようかなというふうに考えてございます。このところは、プラントシステムと炉心のインターフェースになるところでございましてけれども、お互いあんまり変更のないような炉特性が得られるような設計をやっていくということになろうかと思えます。

それから、日本に適用するときの規制委員会の厳しい指摘ということでございますけれども、当然、ABWRにおいても厳しくなっているところを、RBWRでいかにインパクトの少ない炉心設計ができるかというところが、肝になってくるかなというふうに思っております。また、六角形にしたところも、例えばシビアアクシデント時に水を注入しても炉心がきちんと冷えるということを解析あるいは実証によって証明していくことになるかなというふうに思っております。そのところは、恐らくどの原子炉でも同じことが起こるのかなというふうに思っておりますので、こういったところも将来の課題ということでございます。

○加藤事業部長

ありがとうございました。

その話でいくと、後ろのほうのPRISMについては、先ほど多分、森中さんがおっしゃられたような話と同じになると思うんですけども、やっぱりかなり概念が日本のプラントの概念と違って、そうすると、そういう意味では、日本の新規制基準に適合させようとする、かなり抜本的に、必ずしも炉心周りはそうでもないかもしれないですけども、少なくともシビアアクシデント対応設備とか、そのあたりは相当工夫が要るかもしれませんね。

○武原執行役常務

これは先ほど来お話しさせていただいているんですが、許認可が国々で違うというのは当然あるんですけども、NRCが多分いろいろやると思いますので、NRCのやった結果と、それが日本にフィットするかどうかについては、別途、時期が参りましたら、ちゃんと議論いただいて、使えるところは使い、それから、日本で追加で試験をやらないといけないところは、試験をやるようなことでやらせていただきたいと思いますと思っているんですが、できる限り最初の段階から本当はいろいろレビューに入っただいて、後からコメントが来ないようにしていただくというようなことになれば、大変ありがたいと思っています。そういうのは、ちょっと今の段階では

難しいかもしれませんが、NRCで何をやっているかをご参考にいただいて、日本の一つの許認可でできるだけ多くつくるようにはご配慮いただければというふうには思います。

○加藤事業部長

ありがとうございました。

○松野課長

もう1個だけすみません。PRISMのほうの資料の16ページに少し書いていただいているんですけども、PRISMはGEの自社開発の部分とDOEの資金、ファンドが入っている部分がありますけれども、この官と民の役割分担をお伺いしたく存じます。書いていただいたものを見ると、一旦自社で開発をされた後、DOEのファンドで設計検討をされて、また自社の開発に戻られて、また2007年からGNEP/IFNECのほうに移っているというようなことになっているわけですが、ここのやりとり、役割分担みたいなのはどういう考え方になっているのでしょうか。

○武原執行役常務

どういう考え方というか、この場合は、GEがずっと自社開発を継続しているんですが、これはDOEのファンドがついたのが、例えばナトリウムポンプのこういうところはどうとか、そういう要素試験をやったらどうだとか、そういうところの提案したところにお金がついて、そこについては部分的に、どうもクリティカルで障害になりそうなところをDOEのファンドでやらせていただいているようなところがございます。それをまた戻して、今度は自分で開発してみたいに、今まではそんなに高額な金額がついているわけではなくて、他のいろんな斬新的な炉と一緒に、PRISMにも何がしかの開発ファンドがついたと、そういうご理解でいただければというふうには思います。何か整合的にきちっととっているかというよりは、できるだけということです。

○村瀬部長

よろしいでしょうか。

それでは、後でもし追加でということがありましたら、まとめたの質疑の中でご議論をいただければと思います。次は山脇先生のご説明をいただいて、討議に移らせていただきたいと思います。

それでは、山脇先生、よろしく願いいたします。熔融塩炉の特徴、それから国内外における開発の状況や今後の展望などについてお話をいただけると承知しています。よろしく願いいたします。

○山脇名誉教授

ご紹介いただきました山脇でございます。本日、国の戦略的な高速炉の開発方針の審議する会議にお招きいただきまして、ありがとうございます。座らせていただきます。

それでは、お手元の資料をごらんいただきながら、説明させていただきます。

最初の表紙に私の所属が出ておりますが、東京大学と福井大学に基盤を置いて今まで研究教育を行ってまいりましたが、その3番目の一般社団法人次世代エネルギー研究開発機構、略してBERDというものを最近設立しまして、そちらでこの熔融塩炉の設計とか調査研究を進めております。また、4番目の日本産業協会の原子力システム研究懇話会のほうにもベースを置いて、活動してございます。

次の2ページでございますが、熔融塩炉というのは何かということについて、既にご存じの方は釈迦に説法になりますが、核燃料に熔融塩を用いる原子炉というふうに定義しております。熔融塩と申しますのは、例えば食塩、これはNaCl、ナトリウムの塩化物であります。これを数百度以上に加熱いたしますと、熔融いたしまして液体状態になります。そういうものを熔融塩と言っているわけで、その塩化物とかフッ化物とか、そういうハライドを用いる原子炉でございます。冷却材にも熔融塩を用いる場合が多いということでございます。

実際に用いられる燃料塩としてはフッ化物塩と塩化物塩がございまして、フッ化物塩にはリチウム、ベリウムのフッ化物、あるいはリチウム、ナトリウム、カリウムのフッ化物に、この AF_3 と書いてあるのは、Aはアクチニドでございますので、ウラン、プルトニウム、マイナーアクチニド等でございます。それから、塩化物のほうは、昔はNaCl-KClと言っていたんですが、最近ではNaCl-マグネシウムクロライドをベースとしたものが主流になっております。冷却材塩につきましては、同じくフッ化物塩、塩化物塩でアクチニドが入っていないというものを冷却材に使っているということです。

次の3ページでございますが、熔融塩炉の特徴としましては、熔融塩が沸点が高く、これは数百度以上なんですね。それから、作動圧力が低いということがございます。また、透明液体であるということです。ただ、いろんなものが溶けていきますと、だんだん濁ってまいります。それから、負のフィードバック係数が大きいこと、ボイド係数、温度係数ともにですね。液体であるということです。それから、セシウム、ヨウ素などの揮発性FPの蒸気圧が比較的低い。環境への放出が少ないということで、また、事故時には燃料塩を退避させるということが可能ですので、安定収束ができる。したがって、安全炉としてすぐれているということと、また、アクチニドの溶解度が大きいので、塩化物ではアクチニドは50%以上と言われておりますが、プルトニウム、マイナーアクチニド、これを合わせてTRUといいますが、TRUの燃焼炉とし

ですぐれているということで注目しているわけです。

次の4ページでございますが、熔融塩炉の分類、その熔融塩燃料という枠に囲まれた左上のほうが中性子減速と書いてありますが、熱中性子型でございます、最初にあるのがループ型、MSREという、オークリッジ国立研究所、オークリッジ研究所で発明されたものですが、当初、熱中性子型のもだったわけでございます。その後、右側の高速中性子を使ういわゆる高速炉に移行してございまして、ヨーロッパとかいろんなところが検討しております。その下のほうのIMSFR、Japanとありますけれども、これが私どもが今、推進しているIntegral Molten Salt Fast Reactorというもので、これは後ほど詳しくご説明いたします。

なお、その下に固体燃料とありますのは、冷却材だけに熔融塩を使うという、中国、アメリカ等で研究開発しています。

それから、次に5ページでございますが、世界の状況をざっとご紹介いたします。

まず、アメリカ。

まず、オークリッジ国立研究所で発明されたということでございまして、1950年代に航空機用のエンジンとして開発されてございます。AREという、Aircraft Reactor Experiment。

それから、1960年代には実験炉が建設され、運転されました。これはMSREと略しておりますが、Molten Salt Reactor Experiment。7.5MW t ぐらいの小型炉でございます。

それから、右側のMSBR、これはMolten Salt Breeder Reactorで、大型炉の設計でございまして、オークリッジが設計したものです。大体電気出力100万キロワットレベルの大型炉でございまして、これは設計だけに終わっているということですね。その図にありますように、炉心では黒鉛の減速材のブロックが積み上げられていると。その中をフッ化物の燃料が循環いたしまして、二次系のフッ化物燃料、そこから蒸気発生器につながって発電するというようなコンセプトでございました。

その次の6ページですが、米国の熔融塩炉開発は、オークリッジ研究所のMSRE、これは1964年から69年に運転いたしました後で、この成功がございました後で、1976年に中止ということになってございます。これは米国の政策の変更でございます。

その後かなり低調な時代が続いたわけでございますが、21世紀になりまして、急にまた関心が高まったということです。そこに代表例として、ビル・ゲイツが社長をしておりますTerraPower社が中心になって提案している熔融塩高速炉、これはMolten Chloride Fast Reactor、塩化物燃料を使った高速炉でございますが、オークリッジ研究所とかEPRIとかSouthern Companyという電力会社等とコンソーシアムを組みまして、DOEから資金援助を得て

ございます。

次のページが7ページ。このTerraPowerの熔融塩高速炉につきましては、今お示ししました2016年型のものでは、中心の炉心部分は中空円筒状になっておりますが、周辺に燃料熔融塩を循環させて熱交換器で二次系に回すという、非常にコンパクトに設計されていると。

ところが、これをさらに発展させたのが、右側の2017年型でございます。これでは熱交換器の部分が非常に大きくしっかりしたデザインになっているということと、それから、矢印が書いてございますが、熔融塩の流れるパスについていろいろ考察を加えているということがわかります。ただ、詳細は発表されておられませんので、こういった図面から推測するしかございません。

次の8ページ、Elysium社。いろんなベンチャー企業が熔融塩炉の設計等を行っているんですが、代表的なものとしてElysium社というのがございます。これはアメリカ、カナダにまたがって活動しておりますが、熔融塩高速炉、この左に図がございますけれども、中心の原子炉本体の周りに一次系のポンプ、それから熱交換器、それから二次系のポンプというようなものが林立しているという図面になっております。

このElysium社の場合は、やはり塩化物を使った高速炉であるということと、燃料としては使用済み燃料を再処理した液体廃棄物を燃料にできると。それから、プルトニウムとか各種ウランあるいはトリウムを燃料にできるということを言っておりますし、また、出力については、10メガワットから4,000メガワットという、小型炉から大型炉まで自由に設計できるということも言っております。

それから、次の9ページ。ThorCon社という、これもベンチャー企業でございますが、これはオークリッジのフッ化物熔融塩炉の技術を継承しております。インドネシアに導入するというので今、煮詰まってきたという。先日、社長のハーグレーブス氏が来て話をされましたけれども、そういうことでございました。また、このThorCon社のフッ化物燃料熔融塩炉については、船に載せて移動させるということが出来るタイプになっておりますので、インドネシアのようにいろんな島がたくさんあるというようなところでは、非常に便利に使える可能性があるというふうに聞いております。

次、10ページ目でございますが、アメリカの状況としては、これはまとめますと、1960年代にオークリッジでフリーベ系のフッ化物でMSREを運転したこと。これは2007年以降に、まず熔融塩冷却材で燃料は固体のペブルベッド型である。これはFHRと呼んでおまして、フッ化物熔融塩冷却高温炉ということですが、これをMITなどが中国とも協力して研究を進めているという

もので、DOEのサポートのもとで行われています。

2015年以降には、DOEがGAINプロジェクトというのを始めておりまして、このGAINというのは産業界、大学、研究機関に対する原子力の革新技術——イノベーションテクノロジーという——の研究支援を行うプロジェクトでございまして、これで大体5,000万ドルぐらい——日本円で50億円以上ですが——の予算を投入してございます。その中に、先ほどのTerraPowerのものもありますし、その下にありますように、いろんなTransatomicとかElysiumもありますし、Terrestrial Energy、KairosあるいはThorCon等々のいろんなベンチャー企業が国立研究所などと組みまして、このDOEの支援を受けていると、そういう状況でございます。

次の11ページですが、アメリカの状況2となっておりますけれども、今のDOEのGAINプロジェクトで具体的にどこがどういう課題で支援を受けているかということでございますが、一々申しませんが、例えば、先ほど挙げたようなベンチャー企業などのと研究所の組み合わせが書いてございますし、課題としては、熔融塩の性質の評価とか、燃焼計算とか、塩化物燃料の開発とか、熱流動解析とか、熱伝導、粘性評価とか、物性評価とか、温度等の計測手法とか、そういったものがいろいろ行われている。

次の12ページは、アメリカの状況のまとめでございますが、真ん中に液体燃料（熱炉）と書いてございます。これにいろいろ各社のどういう、例えば燃料塩、減速材としてどういう組み合わせかとか、あるいは原子炉の名称とかいろいろございますが、燃料塩は熱炉の場合は大体フッ化物でありまして、減速材にはグラファイトかジルコニウムハイドライドが使われます。それから、下のカラムには液体燃料（高速炉）がございまして、これにもElysium、TerraPower等々ございまして、こちらは塩化物、NaClなどの塩化物を使っております。出力については、小型炉がメインですが、大型炉も提案されている。

次の13ページにいきまして、中国でございます。それで、中国は非常に積極的に熔融塩炉開発をやっております、上海応用物理研究所、SINAPと略称しますが、これを中心に多くの大学が参画していると。トリウム熔融塩炉の開発計画ということが中心ですけれども、先ほどの固体燃料で冷却材を熔融塩にするという、そういう固体燃料型のものにあわせて開発をしているということで、右上の図がその2種類の熔融塩炉の開発のタイムスケジュールです。上のTMSR-SFというのはソリッドフュエル、固体燃料、それからTMSR-LFがリキッドフュエルですから液体燃料で、それぞれ開発しております、2025年までに10メガワット固体燃料炉と2メガワット液体燃料炉の試験炉の建設を完了させる予定であるということになっております。それに関連して、いろんな物性だとか熱伝導だとか等々、各種の試験が現在行われておりまして、

その下に書いてありますように、500人から700人の若い研究者が、多くは大学を出たばかりというような、びちびちした若い研究者が熱心に参画しているということです。

14ページのほうでは、その中の液体燃料炉のことをちょっと取り上げておりましたが、2メガワットという小型炉でありまして、フリーベというタイプのフッ化物を熔融塩に使っていると。そして、サイトが甘粛省の武威、Wuweiというところに決まっております、2020年代初めに稼働するという予定になっております。

次が15ページ、EUの状況でございます。ヨーロッパ連合は、SAMOFARという、これはSafety Assessment of a Molten Salt Fast Reactorということで、熔融塩高速炉についての安全評価という枠組みをつくりまして、フランス、ドイツ、オランダ、イタリア、スイス、メキシコが参画して開発を進めておると。そこにWP1から6までテーマがございますが、安全評価とか燃料塩の物性評価、熱流動とか数値解析あるいは塩の化学とか再処理、そういったようなものを今、並行して進めているということでございます。

下の16ページのフランスは、今のSAMOFARの枠組みのほかに、GIFという第4世代の枠組みとかで、これも長く昔から検討を進めておりまして、MSFRという独自のフッ化物燃料熔融塩炉を開発をするということで進めていると。その下に熱解析のモデルとそれから炉の断面図がございますが、その炉断面図の炉心部から下にチューブが出ておりますのは、事故が起こりそうなときに燃料を下にドレーンするという、下のドレーンタンクなども非常に詳細に設計しているということがございます。

それから、次の17ページでございますが、イギリスの状況ですが、イギリスではやっぱりベンチャー企業でMoltex Energy社というところが、SSR-Wというピン燃料型の熔融塩炉を提案しておりまして、これはピン燃料型というのは、PWRの燃料とそっくりの形のもので、それを燃料集合体に組んで、PWR炉心と同じような炉心を構成するというわけです。そのピンの中に熔融塩を詰めているという。これは塩化物燃料を詰めた高速炉を想定しているということで、その一番下にありますカナダのニューブランズウィック州でことしの4月にこのMOLTEXのSSR-W炉を州内に建設するということを目指すということが発表されております。

それから、次の18ページ、ロシアの状況。ロシアではやはり長く熔融塩炉に取り組んでおりまして、クルチャトフ研究所で研究が行われております。このMOSARTという計画でございますが、MOSARTというのは、モルトソルトを使ってアクチニドのリサイクルとそれから核変換を行うということで、ヨーロッパのSAMOFARとも協力していると。フッ化物を使って核変換をします。トリウム増殖炉も検討するという。その右側にあります材料の腐食試験等も行っております。

す。

次の19ページ、その他の国として、カナダ、オランダを挙げておりますが、カナダではやっぱりベンチャー企業でテレストリアル・エナジー社が統合型溶融塩炉というのを提案しておりまして、チョークリバー研究所の敷地内に設置するというので、フィージビリティスタディが行われて、カナダ政府も非常にサポートしている状況です。それから、オランダについては、オランダの原子力研究機構、NRGの高中性子束原子炉がございますが、これを使って、フッ化物溶融塩を現在、中性子照射しているという段階です。

それから、次の20ページ、まとめでございますが、各国それぞれ特徴のあるMSR推進プロジェクトを行っておりまして、いろんなテーマについて研究あるいは開発が進んでおりまして、早ければ2020年代には新しい試験炉・実証炉が稼働するということが期待されて、あるいはそれを目指して努力がされていると。

MSRのまとめ（各国）、21ページ、これはアメリカ以外でございますが、真ん中の液体燃料（熱炉）のところには、先ほどのMOLTEX社なんかもありますし、それから韓国とか中国、それからインドもですね。インドは高速炉、下のほうにBARCというのがありますが、そういう国も研究開発を進めていると。それから、ロシアもでございますが、やはり液体燃料、熱炉はフッ化物、高速炉は塩化物のところが多いということです。そして、出力については、小型炉を中心に大型炉もあります。

次の国内の状況、22ページ。国内では、日本原子力学会の中に「溶融塩技術の原子力への応用」という研究専門委員会が設立されまして、これは2013年から17年まで活動いたしました。主査は私、山脇が務めておりましたが、約50名の学産官から熱心なメンバーが相集いまして、国内外の調査あるいは溶融塩炉の再検討、開発の方向性を議論いたしました。

その次の24ページ、その中から明らかになってきた溶融塩炉の研究活動のハイライトとして、委員会活動とか、それから、個別研究としては福井大学とか東大とか東京都市大学が代表的なものになっておりますが、燃料の揮発性だとか、材料の溶融塩腐食とか、溶融塩化学、あるいはシミュレーション研究というようなことが行われています。

なお、そこに関連研究と書いて、高速炉、核融合というのがありますが、溶融塩炉を目指したものではありませんが、電中研では、先ほど日立さんからご説明がありましたような、金属燃料高速炉の乾式処理の研究をずっとやっておられ、IFRに関係したあれですね、それがそのまま溶融塩炉にも活用できるということでございます。また、核融合研究所でも核融合炉のためにフッ化物のループをつくった試験をされておりますが、これもそのまま溶融塩炉に活用で

きるものでございます。

概念設計として、福井大、東大等々で新しい安全炉、あるいは核変換に適した新型炉として、統合型熔融塩高速炉、先ほども申し上げましたが、Integral Molten Salt Fast Reactor、IMSFRというものを提案して、現在その設計を進めているところです。また、元豊橋科学技術大学の三田地先生のところでは、熔融塩炉が核変換、マイナーアクチニドの核変換に非常に有効であるということを計算で示しておられますので、これも後ほど紹介いたしますが、そのような活動がございます。

25ページ、それらのハイライトとして、福井大学、私も参画したんですが、熔融塩からの揮発性FPの放出。質量分析計を使いまして、このフリナックというフッ化物、あるいはそれにセシウムやヨウ素を添加したものについて、どのような化学型で放出されるか、あるいはどのくらいの放出量になるかというふうなことを測定いたしまして、過酷事故を想定すると、FP放出量は軽水炉に比べてかなり桁違いに低いということを確認いたしました。

それから、26ページ、熔融塩化学の研究、これは東大、寺井研ですが、これもフッ化物熔融塩からのセシウムやヨウ素の蒸発量を、トランスピレーション法という、そこに装置の図がございますが、アルゴンを流して蒸気を飛ばして、トラップに集めて分析するというふうな方法で直接調べたり、その他、左の四角にありますような中性子照射実験もやっておられますし、あるいはREDOX制御といったような熔融塩化学の研究というようなこともやっておられる。

それから、下の27ページは、フッ化物熔融塩で使われる材料がニッケル合金のHastelloy-Nなものですから、そのHastelloy-Nの熔融塩による腐食ということを福井大学の福元教授のところで行われて、電顕で詳細なメカニズムの解明をされている。

それから、次の28ページは、先ほど申し上げました元豊橋科学技術大学、三田地先生のところでTRU——これはプルトニウム、プラス、マイナーアクチニドですが——を熔融塩高速炉で照射することによって、どのくらい削減できるかということのシミュレーション計算をされまして、これ、2段階、80年間の運転で再処理を2年サイクルで行った場合には、そのTRUの消滅する率が89%であるということを示された。非常に効率がいい。

次の29ページには、さらにそれを取り上げて強調してございますが、TRUの高い核変換率、核変換というのは減量と毒性低減ということですが、これがMSRで期待できるということで、今の2段階照射、2年ごとの再処理なら89%削減、これを1年ごとの再処理にすると、90%削減できるということで、一方、私どもの提案しているIMSFRでありますと、これはほぼ連続に近い再処理が可能。オンライン再処理でございますので。しかも塩化物であると。塩化物という

ことは、より高速中性子のエネルギーが高くなるということなので、もっと変換率を上げられますので、90%以上の削減を見込むことができます。

他方、固体燃料炉、例えば酸化物燃料高速炉などでは発熱の影響がございます。つまり、マイナーアクチニドなどを入れた燃料は、自然自発的な加熱という、発熱があるわけですね。ですから、あまりたくさん入れることができないんです。ですから、アクチニドの装荷量が10%以下というのが普通であって、なかなか高いTRU、の消滅率というか、削減率を期待できないわけです。これは熔融塩炉であれば、溶解度は塩化物で50%以上ということもありますが、20~30%ぐらい装荷して、連続消費ということが出来ますので、非常にTRUの削減率というか、核変換率が高い、効率のいいシステムになるということが明らかになりました。

次の30ページ、これはMSRの概念設計（国内）ということで、これは主として私どもの行ったことです。

31ページ、熔融塩炉に何を期待するか。これは、まず我々の社会はゼロ炭素社会へ向かっていると。そのためには再生可能エネルギーを大幅に導入しなければならないと。そうしますと、これは時間的に不安定な電源でありますので、補助電源という、バックアップ電源が必要となり、熔融塩炉が期待されます。また、ベースロード電源としても原子力エネルギーが非常に重要になってくるということで、原子力エネルギーをいかに社会に受容していただけるかが重要ということです。そのためには、原子力の最大の欠点と見なされている事故安全性、それから廃棄物問題、その2つを解決するということが必要になるということなので、それを熔融塩炉は、先ほどから申し上げましたように、核変換処理は非常に効率が高いということなので、あと、安全炉、十分安全であれば、十分この期待に応えられるだろうということです。従って、熔融塩炉は原子力イノベーションの旗手として十分な資格があるというふうに判断いたしました。いろいろ検討してきました。

32ページは、先ほど述べたように放射性廃棄物問題は十分対処できる可能性があるということがわかりましたので、安全炉としてはどうかということで、過酷事故フリーを目指すような原子炉として、そこに示しました静止燃料型熔融塩炉をまず提案したと。これはスタティック・フュエルMSRです。これはその図に描いてありますように、燃料塩はコアの中に、炉心のタンクの中にだけあるというわけでありまして、周りは燃料のない冷却材の熔融塩で取り囲んでいるというものでございまして、これだと燃料塩が漏れても周りの冷却材の中に広がるだけですから、過酷事故にはならない。

さらに、これに燃料再処理系を一体化させますと、使用済み燃料を移動させるとか、そうい

う必要がなくなりますし、先ほどの廃棄物処理の効率も上がるので、燃料再処理系との一体化をさせよう。これが統合型溶融塩高速炉、Integral Molten Salt Fast Reactor、すなわち IMSFRでございます。

次の33ページに、そのIMSFRの概念をポンチ絵で示しておりますが、原子炉本体は先ほどの静止燃料型の安全な原子炉になっておりまして、そこから燃料を間欠的に抽出して、左側の溶融塩再処理プラントへ持っていくと。ここの乾式処理で液体金属抽出という方法を使いますと、燃料は液体のまま炉心と処理系との間の移行ができますので、先ほど日立さんからご説明ありましたアルゴンヌのIFRですと、固体燃料を液体燃料に変えるというプロセスがあるわけなんですけれども、それが無い、これは液体のまま移動できるから、まさに一体化したシステムになるということでございます。

ここに先ほどのアメリカのベンチャー企業Elysium社が言っていたような、再処理で取り出したようなものを入れるとか、いろいろなことも可能になりますし、あるいは高レベル廃棄物、場合によっては燃料デブリからのマイナーアクチニドなどもここに入れ込めば、そういうものも核変換、処理できるということです。

次の34ページ、このIMSFRの溶融塩炉処理系でございますけれども、これはコアのところと、必要があればブランケットをつけてもいいんですが、塩化物溶融塩を循環させまして、液体金属、このビスマスとかガリウムといったようなもので、液々抽出を使うということを提案いたしております。

それから、35ページ、塩化物とフッ化物の比較でございますが、もう時間がなくなっております。急いで言います。塩化物のほうが温度が低いとかステンレスが使えるとか、中性子エネルギーが高いとかいうふうなことで、非常に有利であるということ。

それから、次の36ページには、最初の私の自己紹介のときに申し上げました次世代エネルギー研究開発機構というものをつくりまして、BERDとっておりますが、そこで今、設計活動を行っております。先ほどのIMSFRの炉心概念図がございましたが、このままではちょっと実現できないので、そこに書いてありますように、熱交換部分をちょっと外に出すとかいうようなことをやる必要があるということで、37ページの、実際には炉心を空洞にして、熱交換器を外に出して、全体をタンクに入れるというような形が現実的であろうというふうに考えまして、その形のを38ページに示しますが、現在、熱流動解析を行っております。これは東工大の望月先生、特任教授ですが、この方はBERDの主要メンバーなんです、今、設計を進めていただいております、その出力分布とか温度分布、速度分布というようなものの計算結果が示

されております。

39ページは、50メガワットの小型炉の概念図です。左右に再処理施設がついております。

次の40ページは、大型炉をつくった場合の想定でございまして、真ん中にドレーンタンクがついているというのがちょっと違いになっており、それから炉のサイズも大きくなっている。

41ページは、ピン燃料型という、イギリスのMOLTEX社が提案しておりましたが、そういったピン燃料を使うタイプのものも検討してございます。これは「もんじゅ」の経験を生かせるということで、次の42ページが、ピン燃料型のもの燃料内部の温度分布とか速度分布等を解析したもので、これを行われた望月東工大特任教授は、元JAEAで「ふげん」や「もんじゅ」で実際に重要な役割を担っておられましたので、その経験を生かしていただいております。

43ページが、その得られた一部、燃料の温度分布とか出力分布等々でございまして。

それで、44ページは、解析条件、結論、これは「もんじゅ」の経験を活用できるということで、これはちょっとパスいたしますが。

IMSFRは、45ページにありますように、塩化物燃料溶融塩炉と乾式処理の組み合わせということですね。

そして、46ページ、IMSFRのメリット。高度な安全性がございまして。原理的にメルトダウンが起きないとか、水素爆発・水蒸気爆発が起きない。それから、バックエンド処理でTRUの核変換処理が高率にできる。それから、核変換炉のほかに再エネバックアップ電源にも適用できる可能性がある。あるいは、小型炉、経済性等も期待できる。それからまた、イギリス・アメリカで似たようなものの提案がありますので、英米の企業、研究機関等との連携ができるということでございまして。

最後、47ページには、溶融塩炉の開発への国のサポート、アメリカのGAIN型支援のようなものが考えられますが、それをぜひ期待したいということでございまして。

以上です。

○村瀬部長

ありがとうございました。大変包括的かつ具体的にお話しいただきまして、我々の理解が進んだと思います。ありがとうございます。

それでは、質疑に入りたいと思いますが、よろしいでしょうか。

まず私、最初にお伺いさせていただきたいんですが、非常にMSRの魅力と申しますか、メリットというか、可能性についてわかりやすくご説明いただいたかと思っております。課題ということであると、今後具体化していく上で一番ハードルとして大きなものとなり得る課題はどのあた

りにあるかというところを、ちょっとご説明いただければと思います。

○山脇名誉教授

従来、実際に原子力をつくって運転されたのはフッ化物燃料なものですから、塩化物については、いろんな試験的なものはやられているんですが、原子炉としての実績がないので、まずその塩化物を実際に原子炉に結びつけるような照射試験とかループ試験とか、そういうふうなことをクリアしていかなきゃいかんというようなところが、まずあろうかと思えます。

それから、安全審査については、実はこれは説明しませんでしたけれども、アメリカのNRCに対して、いろんな先ほどのGAINでサポートを受けているテレストリアル・エナジー社とか、いろんなところが既にNRCと打ち合わせをしております、安全審査がどういうふうになっていくかについて検討が進められていると。

それから、中国とアメリカが協力している熔融塩冷却高温炉プロジェクトがあるんですけど、そういうふうなものについても、安全審査の基準とかについて、もちろんこれは過去にはオークリッジで実際に実炉ができて動いているわけですから、そのときの基準というのはもちろんあるわけですが、それを現代版にするというふうなことで、アメリカ、原子力学会の中にワーキンググループができて、実際の検討がされている。そのNRCともコンタクトしてやられているということです。

だから、それが日本の場合に、もちろんそういうところと協力して見通しを得る必要があるんですが、日本独自に安全審査をどうやって進めるかとかいうふうなことも重要な課題かなと思っております。

○村瀬部長

ありがとうございます。

それでは、じゃ若月課長、お願いします。

○若月課長

すごく基本的なところで恐縮なんですけれども、普通の原子炉と比べて、制御棒みたいのが見当たらないんですけれども、炉の出力制御というのはどうされているのかというのを教えてくださいませんか。

○山脇名誉教授

制御棒は、先ほどの図には描いてないんですけれども、実際には制御棒を使う設計です

○若月課長

ありがとうございます。

○松野課長

ありがとうございました。

熔融塩は燃料そのものが配管を通過してぐるぐる回っていくということになるんだと思うんですけども、そうすると、お話の中にもありましたけれども、材料開発みたいなものが相当課題であるというお話もありました。現時点で材料について何か方向性が見えてきているようなものなのか、それとも全く新しい材料じゃないと対応できないようなものなのか、どうお考えでしょうか。

○山脇名誉教授

既にフッ化物燃料熔融塩炉では、さっきのHastelloy-Nというようなニッケル基合金で実際に数年運転しておりますので、それを改良していけばいいということです。それから、塩化物燃料の場合は、運転温度が低いこともあって、通常のステンレス鋼、ステンレススチールが使えるというのが非常にメリットでございまして、ステンレススチールだと、もちろん非常に世の中で広く使われている経験があるのがメリットですね。ただ、それを照射下で、照射条件で使うということについて、アルゴンヌのIFRの乾式再処理での実績などはありますが、まだデータが不足しています。材料はほぼ見通しがついていると考えております。塩化物であればステンレス鋼でいけるし、フッ化物ならニッケルベースでいけるということです。それから、照射試験みたいなことも部分的にやられているわけですから、それをさらに詰めればいいということで、材料問題がネックになるという可能性は低いと思っておりますが。

○松野課長

わかりました。

もう一つよろしいですか。一応、材料を含めてできたとして、今ある軽水炉と大分構造が違うので、実際にオペレーションをするときに、現場の運転員さん初め、あと、運転の段階での当然違いというのも出てくるでしょうし、点検とかメンテナンスが相当、今と変わるんだろなという印象を持ちました。そういったオペレーションであるとか点検・メンテナンスまで含めたときに、現実的なものになるのかどうか。燃料が炉の中を動くとなれば、当然、遮へいとかそういったことも考えなければいけないでしょうし、中に入って点検ということができるとかどうかという質問なんですけれども、できないとなれば、IoTを含めた別のやり方で対応するとか、いろんな工夫を重ねていかないと、実運用には至らないのかなという印象を受けたんですが、その辺の費用はどうお考えでしょうか。

○山脇名誉教授

ええ。メンテナンスの問題は非常に我々も重視しております、先ほどのピン燃料型という、PWRのようなピン燃料を燃料集合体にして使うというような場合でも、さっきのMOLTEX社などは全体を動かして炉心外へ取り出せる、燃料集合体の束をですね。そういう新しいシステムをつくっております、ですから、もちろん検査するときは熔融塩を落としちゃうというか、抜いて、それで抜いた状態で燃料集合体構造を外へ取り出してくると。そういうシステムを彼らは提案しているんですね。

それから、私どもが検討したIMSFRでも、最初は燃料棒みたいなものをずっと炉心に通して、その中に冷却材を流すというようなものを考えたんですが、それだと、おっしゃるとおりに、溶接部分のメンテナンスというか、検査とか、それをやるのが非常に難しいので、それで、先ほどお示しましたような中が全然何もない中空円筒というふうなタイプにして、外に熱交換器を持ってくる形を考えました。そこではメンテナンスは非常に簡単ですから、そういうタイプにしたわけですね。中空円筒型であれば、これは熔融塩を抜いて中を見るということは簡単にできますので、それほど難しい問題じゃないというふうに思っています。

○松野課長

ありがとうございました。

○村瀬部長

それでは、メーカーの方にも来ていただいていますので、日立さん、どう見ておられるかも含めてご質問などいかがでしょうか。

○小澤チーフプロジェクトマネージャー

ありがとうございます。

さすがに若い研究者の方々も一緒になってやっているなという、新しいアイデアを盛り込まれているかなというふうに思っております。大学などで研究しているのが、いい結果がもたらされているのかなというふうに思いますけれども、少しものづくりの観点で見ると、まだまだ私ども自身も勉強しなければいけないところがあるかと思っておりますので、その辺は課題ですが、まだ検討したことがないので、これからなのかなというふうに思っております。

○村瀬部長

ありがとうございます。

JAEAさん、どうですか。

○青砥理事

ご存じでしょうけれども、我々としては、今のナトリウム冷却MOX高速炉を開発するに当た

って、今から15年ぐらい前になりますが、6炉型についてその時点での評価をしております。その時点での評価から、今日、先生、それからその前の方の発表の中で、新たにつくられたというか、開発が進められた部分がたくさんあると思いますので、そういった部分も含めて、いわゆるこの議論の中で、冒頭というか、第2回目か3回目にマグウッドさんが来られたときに、こういう研究開発はかなりオプションをふやして対応していくということが一つのキーであろうという話をされておりました。今日、さまざまな角度から、今のは大学あるいは研究者の方々が自前でもって炉心を中心に確認されているというふうに理解しましたがけれども、今後こういったものをどうやって全体としてインテグレートしていくかとか、対応していくかというのは、考えたいと思います。ただ、いずれにしても、同じ指標から一度はこうしたものは総括的に評価をするという機会はあるだろうというふうに思っております。

○山脇名誉教授

今おっしゃった、昔、JAEAで熔融塩炉についても検討されたというのは、まさしくそのとおりで、我々は、そのレポートを入手しました。FaCTを進められたときに、熔融塩高速炉についても一応検討されて、レポートをつくっておられるんですよ。非常に詳細な検討をされていて敬服したんですが、結論としては、性能の可能性としては非常に高いと評価されておられながら、ちょっとまだデータの不足な点が幾つかあるということで、当時の段階ではナトリウム冷却のほうが進んでいるというふうな結論だったと思うんです。ですから、決して否定的な結論を出しておられなくて、我々も非常にエンカレッジされたということがございました。

○村瀬部長

ありがとうございます。

それでは、重工さん、いかがですか。

○加藤事業部長

今日は非常に大変貴重なお話を聞けて、ありがとうございました。

いろいろ世界各国で炉の開発がなされているというふうに認識しましたがけれども、例えば軽水炉とかの知見では、40年とか60年とかというふうないわゆるプラントの設備の経年劣化とかというのをよくやっているんですけども、そういうような観点から熔融塩炉で、私もあんまりよくわからないんですけども、特に注意すべき、そのあたりの劣化モードというか、材料というか、そのあたりって何かあるんでしょうかね。

○山脇名誉教授

ええ、まさにそうですね、そこは非常に重要なポイントだと思います。オークリッジで5~6

年運転したといっても、実際に30年とか50年、60年使えるのかということに対する回答は出ておりませんので、それはこれからの努力でやっていくよりしようがないんですが。10年、20年と試験炉を最初につくって、試験をしながら材料の劣化等を調べて、その対応をとっていくというようなこと、これは今までの高速炉だってそういうことをやってこられたわけですから、同じようなプロセスで検討を重ねていくということが課題になっていくと思っております。

○加藤事業部長

ありがとうございました。

○小澤調整官

先生、ありがとうございました。

熔融塩と聞くと、先ほど言ったような劣化とか、特に腐食の問題とか、そちらのというのはすごくどうしても気になっちゃうんですけども、そこはそれなりにめどが立ちそうという感じなのか、それともやっぱり相当技術的には超えていかないといけないという感じなのか、そこは今どんな状況にあると思うのでしょうか。

○山脇名誉教授

腐食について確かに多くの方が心配されるし、確かにそれは事実な点です。当初、実はオークリッジで運転されているところに、ちょうど私の属していた研究室でも熔融塩炉の研究をやるということで、最初にやったのが材料の熔融塩による腐食問題だったんですよ。ところが、物すごい腐食をするわけですね。これはだめだと、その大学院生は結論したんですが、後から考えると、結局、空気とか水とかが混入してくると、そうなるんですよ。ですから、それらを遮断して空気・水が入ってこないようなシステムにすれば、腐食は十分問題にならないレベルにまで防げるということになりましたのでね。オークリッジでもそれで実験炉が実現できたわけですね。

それから、テルルというFPが特に腐食に対して悪いということもわかっておりまして、それに対して当時としては新しいHastelloy-Nという合金を開発して、それでテルル腐食についても相当緩和されて実用になったということもあります。

ですから、腐食問題は非常に重要なんですが、決して解決できないことじゃないと思います。先ほどちょっと言いました、IFR、金属燃料の高速炉でも再処理部分は塩化物の熔融塩を使っています。それから、核融合炉でもブランケット部分に熔融塩を使ってトリチウムを回収するというふうなことは、相当一生懸命やられているんですよ。だから、そこでも皆同じ問題があるんですね。だけど、それぞれ相当努力して解決されておりますのでね。だから、決して解決

できないことじゃないというふうに思っております。

○村瀬部長

一時期、アメリカ等で政策変更なんかで開発を中断されたようなものがあつた一方で、最近、改めてアメリカとかカナダとか、ベンチャー的な企業も含めて、再びMSRが注目されてきているということでお話あつたと思うんですけども、その背景にある一番大きな変化は何だと考えておられますでしょうか。

○山脇名誉教授

1970年代に熔融塩炉計画が中止されたのは、ナトリウム冷却高速炉のほうを国策として進めるということになったものですから、。ナトリウム冷却高速炉と熔融塩炉が拮抗していたわけですね、それまでは。それで、後から見ると非常にポリティカルな決定だったわけです。

ところが、ナトリウム冷却高速炉もその後いろいろ問題があつて、アメリカでは少なくとも実用までいってないわけですね。それで、そのオルタナティブとして熔融塩炉というのがまた出てきたということがありましようし、もともと燃料を液体にするということが従来の高速炉なんかと違うので、その液体燃料のメリットを生かしたいという、特にMAの核変換とか、そういうふうな意味では液体燃料というのが非常に有利ですから、そういうところが内情にあるんじゃないかと。

それと、安全性というのが、軽水炉のような、福島事故のような、ああいう水素爆発というのがありましたが、ああいうのは熔融塩炉では、要するに水素を使ってないので水素が出てくることがないわけですから、水素爆発はありません。あるいは、水蒸気爆発とかそういうものもないわけで、非常に安全なんですね。漏れても、ただそこで固まるだけですから、そこから水素が出て爆発するとか、そういった心配はないので、だから、その安全性は非常に大きいと思います。

○村瀬部長

ありがとうございます。

その他ございますでしょうか。じゃあ。

○若月課長

両方に関わる部分なんですけれども、サイトの近くで再処理をすると。先ほど、PRISMもまさに金属燃料で、今回、熔融塩炉も日立さんもそうなんですけれども、GEさんがDOEと研究をしている際に、日本のメーカーとしてオンサイトでの再処理について、どこまで深く関与されていらっしゃるかとか、そこら辺の感じをお聞かせいただければ。

○山脇名誉教授

さっきのアメリカのIFR、Integral Fast Reactorから我々は拡張して、IMSFRと言っているわけですが、ただ、IFRでは、今おっしゃったように、原子炉があって、それから同じ建物の中に再処理ファシリティというか、装置があるというわけですね。だから、その間へは必ずしも直結してない。要するに、燃料棒を取り出して運んでいくということでしょう。固体燃料を出して、一遍液体にして、それから液体の熔融塩の処理をするという。それでも一つの建物の中にあるからインテグラルとこう言っているわけですが、我々のIMSFRはもっとくっついて

○若月課長

パイプでくっついているんですか。

○山脇名誉教授

そうです。まさに一体化しているわけですよ。燃料が液体で、それをそのままパイプを通して運んできて、そこで液体金属抽出をやって、また戻すわけだから、全く装置として一体になっている。本当の意味のインテグラルということだと思っているんです。だから、さらに一段進んでいるということですね。

○若月課長

ありがとうございます。

○小澤チーフプロジェクトマネージャー

恐らく、過去、ANLで研究していたものは、今おっしゃったように、炉と再処理側が系統でつながっているわけではなくて、同じ施設の中で別々に研究をやっていたということで、それを統合しても、やはり燃料を抜いて、再処理を同じサイトでやるということは、おっしゃったとおりだと思います。それで、過去の実験ではありますけれども、アメリカとは恐らく日本の研究者との交流ベースの話ぐらいで、幾つかの試験を共有しているのかなというふうに思います。その後の太い研究があったかどうかというのは、余り承知はしていないんですけれども、多分そういった知識がアメリカ側にたまっているんだろなというふうに思っております。

○若月課長

ありがとうございます。

○村瀬部長

よろしいでしょうか。

その他よろしいでしょうか。お時間にもなっておりますので、よろしければこのあたりで議

論を閉じさせていただきたいと思います。

本日は、山脇先生、それから日立の、それから日立GEのご協力を得て、審議をすることができました。本当にありがとうございました。

この高速炉ワーキングでは、高速炉開発方針というものにのっとりまして、高速炉開発に当たってはさまざまな炉型、これまでの主概念として取り組んできたもの、それからそれ以外のものも含めて、さまざまな炉型の国際動向について、情報、国際的な動きも含めて、しっかりとこの場でご説明いただき、ご議論いただいた上で、ロードマップ策定に活かしていこうということになってございます。

今日は、メーカーさんとして、具体的に取り組んでおられる炉型開発の動き、それから他のオプションとして研究を進められている炉型、さまざまな情報をいただきまして、今後のこのワーキンググループの検討に大いなる参考、それから有意義な情報をいただけたというふうに考えてございます。今後ともさまざまな炉型の開発の動向、国際動向、それから研究開発の動向も包括的にこの場でご紹介をさせていただいて、今後のロードマップ作成に向けた検討をさらに進めていきたいと考えてございます。今日は有意義な議論をさせていただくことができたと思います。説明者の方々に心から改めて感謝を申し上げたいと思います。

それでは、本日の議論はこれまでとさせていただきたいと思っております。引き続きロードマップ策定、年内を目指してということになってございます。さらに年末に向けましてインテシブな議論を進めさせていただいて、ロードマップの年内策定に向けた歩みを進めさせていただきたいというふうに考えてございます。

次回以降の進め方につきましては、本日の議論も踏まえた上で、また事務的にご連絡をさせていただきたいというふうに考えてございます。関係者の皆様方には引き続きのご協力をお願い申し上げたいと思います。

改めまして、今日参加いただいた皆様に感謝を申し上げたいと思います。ありがとうございました。