

第35回原子力委員会定例会議議事録

1. 日 時 令和6年10月29日（火）15：30 ～ 16：54

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

徳増審議官、山之内参事官、武藤参事官

一般財団法人 電力中央研究所

新井研究参事

4. 議 題

（1）原子炉の長期運転に向けた原子炉圧力容器の中性子照射脆化に係る取組みについて

（2）その他

5. 審議事項

（上坂委員長）それでは、時間になりましたので、令和6年第35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、一つ目が原子炉の長期運転に向けた原子炉圧力容器の中性子照射脆化に係る取組みについて、二つ目がその他であります。

それでは、事務局から説明をお願いいたします。

（山之内参事官）一つ目の議題、原子炉の長期運転に向けた原子炉圧力容器の中性子照射脆化に係る取組みについてということで、一般財団法人電力中央研究所研究参事の新井様から御説明いただき、その後質疑を行う予定でございます。

本件につきましては、原子力利用に関する基本的考え方の「3.2. エネルギー安定供給やカーボンニュートラルに資する安全な原子力エネルギー利用を目指す」に主に関連するものとなっております。

それでは、新井研究参事、御説明よろしくをお願いいたします。

(新井研究参事) 電力中央研究所の新井拓と申します。本日はよろしくお願いいたします。

私の方からは、「原子炉の長期運転に向けた原子炉压力容器の中性子照射脆化に係る取組み」ということで御説明をさせていただきます。

この議題については、2022年にも当所の曽根田の方から御説明をさせていただいておりまして、そのときには高経年化対応全般と照射脆化の管理に関して全般の話をさせていただきました。今回は私の方からは、中性子照射脆化の取組の中でも脆化予測とそれを支えるマイクロ組織の評価という観点から、長期運転に向けてどのような取組をしているかということについて御説明をさせていただきます。

じゃ、次のスライドをお願いします。

本日の内容はこのような形になっております。

それでは、次、お願いします。

これは国内の原子炉の状況ということで、改めて御説明をするほどのものではありませんけれども、本日、東北電力の女川2号機が再稼働予定ということで、国内のBWR電力も再稼働が始まっていくということになりますので、今後、再稼働が進んでいくものというふうに考えられます。

これから原子力発電をどう使っていくかということに関して言えば、もうじき出てくる第7次のエネルギー基本計画の中で示されると思いますけれども、我々研究機関としては、原子力発電を長期に使っていく、既存の発電所を長期に使っていくという方針が出たときに対応できるように、きちっと研究開発を進めていくということが重要であるというふうに考えております。

次、お願いします。

長期運転において特に考慮すべき劣化事象というものがあります。それはどのようなものかと申しますと、運転期間が長くなることに伴い劣化が進行する現象であり、かつ取替えが容易でない機器・構造物に発生する劣化事象ということで、原子炉压力容器の中性子照射脆化から、以下、五つの現象が挙げられております。これらは高経年化対応で重要な6事象というふうに呼ばれており、高経年化技術評価においてもこれらを中心に高経年化対応が審査されております。本日はその中でも一番重要な原子炉压力容器の中性子照射脆化について話をさせていただきます。

じゃ、次お願いします。

じゃ、原子炉压力容器の中性子照射脆化なんですけれども、まず压力容器に行く前に、そ

もそも中性子照射脆化はどのような現象かということについてお話をさせていただきます。

中性子照射脆化は、鋼材に中性子が照射されることにより、鋼材の粘り強さが徐々に失われていく現象でございます。これを我々どのようにして把握しているかという、シャルピー衝撃試験というものを行って、このときに試験片を破壊するのに必要なエネルギー、これを吸収エネルギーと呼ぶんですけれども、この吸収エネルギーの温度依存性の変化から脆化量というのを評価しております。

下の図は、横軸に温度、縦軸にシャルピー衝撃試験を行ったときの試験片を破壊するのに要した吸収エネルギーというものを示しております。このシャルピー衝撃試験はどのようなものかということについては、次のスライドで御説明をさせていただきますので、まずはこの現象について御説明させていただきます。

縦軸の吸収エネルギーは、値が小さいほど鋼材の粘り強さが小さい、低いということを示していて、値が大きいほど鋼材の粘り強さが大きいというものを示しております。一般の金属は温度が低いときにはこの吸収エネルギーの値が小さい、つまり粘り強さが小さいという状況になっておりまして、これがどんどん温度が上がっていくにつれてこの吸収エネルギーが増加してくると。ある一定の値になると吸収エネルギーが一定の温度になるという、そういう性質を持っております。

この鋼材に中性子が当たりますと、この緑のカーブからオレンジ色のカーブのように、高温側にこのカーブ全体がシフトしていくという現象と、それから、高温側で一定の値を示す上部棚吸収エネルギーという値が少し下がってくるという現象があります。これが中性子照射脆化というものになっておりまして、この脆化量というのは、この図の下の方の左側に点々で41ジュールと書いてありますけれども、シャルピー吸収エネルギーが41ジュールを示す温度がどれぐらい高温側にシフトしていくかということで評価をしております。この41ジュールって中途半端な数字というふうに思われるかもしれませんが、これはアメリカの30フィートポンドをSI単位に直した値になりまして、アメリカで30フィートポンドをもともと使って評価をしていたので、日本でもその値に相当する41ジュールで評価しているということになります。

ここの図の中に運転温度域というのが書いてありますけれども、実際に軽水炉の運転温度域は、このシャルピー吸収エネルギーという観点からいきますと、粘り強い性質を持っていて、その値がかつ安定している上部棚吸収エネルギーという領域で運転をしておりますが、中性子照射脆化が進めば、オレンジ色の矢印が高温側にシフトしていくように、徐々にこの

高温側にカーブがシフトしてくるということ、それから起動・停止時はより低い温度を通るということ、さらに、何かトラブルがあつて原子炉压力容器の中に緊急炉心冷却水が注入されるような場合には、急速に原子炉压力容器が冷やされて低温側に行くということです、このオレンジ色のカーブがどの程度高温側にシフトしているかということの評価していくことが重要となります。

じゃ、次のスライドをお願いします。

じゃ、実際にシャルピー衝撃試験というのはどのように行われているかというのを簡単にお示しします。

まず、右の上に試験前・試験後というものがあつて、これが試験片になっておりまして、試験片は角柱の試験片なんですけれども、断面が10ミリ掛ける10ミリ、長さが55ミリの角柱の試験片になっていまして、片面にノッチと言われる切り欠きが入っております。この切り欠きを背中側からハンマーで叩くことによって、試験片を破壊するというものになっています。

左側にシャルピー衝撃試験の画像が入つていまして、ハンマーが振り上がった状態で固定されているのが分かると思います。このハンマーの固定を外しますと、このような形でハンマーが下にぐるっと下りてきて、位置エネルギーが運動エネルギーに変換され、その運動エネルギーを用いて試験片を破壊しております。

じゃ、右側の試験片の破壊の様子もお願いいたします。スローで捉えていますので、試験片が当たるところが見えるのではないかと思いますけれども、このように今ハンマーが下りてきていて、ここで試験片に当たって試験片が二つに割れると、このような試験を行っております。このときに最初のハンマーの位置から試験後のハンマーの高さの差、これが試験片を破壊するのに使われたエネルギーということですから、これを求めてシャルピー吸収エネルギーというふうにしております。

じゃ、次、お願いします。

じゃ、このような中性子照射脆化がなぜ生じるかということについて、次、お話をさせていただきます。

この画像ではちょっと左側の図がすごく見づらいんですけども、紙の上では右側に薄い水色で丸い点々がしっかり並んでいるものが見えると思います。これが金属の格子を模式的に示したものであります。金属は原子が規則的に並んでいる、格子状に並んでいるというもので構成されておまして、この模式図では鉄原子を薄い水色、製鋼過程に入ってくる不純

物や鋼材の性能を調整するために入れるような添加物というものをオレンジ色の丸で示しております。

このような構造を持った金属に中性子が当たりますと、原子に当たって原子をはじき出します。そうすると鋼材中に結晶の乱れ、格子欠陥というのを生じます。この図ですと左上のところに空孔というのがありまして、その隣にS I Aというのがあります。例えば分かりやすい説明をしますと、中性子が当たってきて原子をはじき出されて、そこに原子がいなくなってしまったのが空孔ということになります。はじき出された原子が近くの原子と原子の隙間に無理やり入り込んでいるというようなのがS I Aというふうになります。

金属は原子が一定の場所に常にいるわけではなくて、この格子状をお互い入れ替わりながら動いておりますので、動いたことによって、空孔が固まっているようなもの、例えば下にある空孔クラスターというようなものとか、ある一定のところに集中して原子が入っていく転位ループと言われるものとか、逆にその抜けてしまうものというものが発生したり、溶け込んでいる溶質原子が一定の場所に固まっていて、溶質原子クラスターというようなものを形成します。

金属の変形はこの格子と格子の間で一斉に滑ることによって変形を生じますので、金属中にこのような照射欠陥のような不均質な部分があると、変形が阻害される。金属が硬くなって、もろくなるということになります。したがって、中性子の照射量が増えれば照射損傷が増えますので、脆化が進むと。要するに、原子力発電所でいえば、運転期間が長くなれば脆化が進むということになります。また、銅などの不純物元素がたくさん入っていて、溶質原子クラスターをたくさん作ってしまえば、滑りの障害になりますから、やはり脆化が進むということになります。このようなメカニズムで中性子照射脆化が生じております。

では、次に、そのような脆化する可能性がある原子炉压力容器というものがどのようなものかということについて、おさらいになりますけれども、簡単にお話をさせていただきます。

原子炉压力容器、言うまでもなく原子力プラントにおける主要構造物の一つでありまして、中に燃料が収められているということで、一番重要な機器になっております。右上に、沸騰水型と加圧水型の軽水炉、压力容器の模式図を示しております。下に概略寸法を示しております。

沸騰水型の軽水炉のBWRの压力容器の直径は、これは110万クラスで比較しておりますけれども、直径約6.4メートルで、高さが22メートル、板厚が0.16メートル、加圧水型、PWRの110万クラスの压力容器は直径が約4.4メートル、高さ12メートル、

板厚0.2メートルということになっております。両者かなり大きさが違っております。この大きさの違いというのは中性子照射脆化にとっては少し意味を持つ違いになっておりまして、炉心領域で核燃料が分裂して中性子が発生するわけです。この中性子は次の核分裂を引き起こすのにも使われますけれども、使われなかった中性子、特に外側に飛んでいくものはそのまま外へ飛んでいって、原子炉压力容器に当たります。このときに原子炉压力容器と中性子の発生した位置が遠ければ遠いほど中性子は減衰しますので、同じ時間で当たる中性子の数は減っていくということになります。

これを見ますと、原子炉压力容器の直径はBWRのほうがPWRよりも一般的に同じ出力で見れば大きいとなっておりますので、BWRの方が同じ運転年数運転しても中性子が当たる数は少ないということになります。実際にPWRとBWR、比較しますと、およそ概算ということで行きますと、BWRの方が中性子照射量は同じ運転年数運転しても10分の1ぐらいということになります。これは中性子照射脆化において、炉径の違いによって進行が違うという理由になっております。

それでは、次、お願いいたします。

このような压力容器が中性子を浴びて脆化しても破壊しないということを確認していくことが重要となります。先ほど申しましたように、運転温度域では材料も粘り強さというのを高い値を示していますので、問題にならないんですけれども、例えば事故時に冷却のために原子炉压力容器内にECCSから冷たい水が注入されるというような場合には、急に冷たい水が原子炉压力容器の中に入ってきますので、原子炉压力容器の内面は急速に冷やされます。しかし、压力容器は、先ほどお話ししましたように、0.16メートルとか0.2メートルという厚い板厚を持っていますので、一気に内外面、同じ温度に冷えるということではなくて、内面が温度が急激に下がる、外面はそれほど温度が下がらないというような状態が出現します。このような場合には、熱収縮の差によって内面に金属を思い切り引っ張るような力が働きます。これが破壊させようとする力になります。この破壊させようとする力よりも、鋼材の破壊に対する抵抗力が事故が起きたような場合においても上回っている、かつ中性子照射脆化が進んだ場合も上回っているということを確認するということが重要になります。

右の図はそれを模式的に示したものになっておりまして、横軸が温度になっておりまして、縦軸が材料の破壊に対する抵抗力と破壊させようとする破壊力になっております。破壊力は右下にあって矢印が左側に向いている山のような形になっているのが破壊力になりまして、運転温度のときにあるときに急激に冷たい水が入ってきますと温度差が生じますので、破壊

力が生じてきてこのような山型になります。しばらくすると内外面の温度が一定になりますので、この山型が消えるというような形になります。この山型になったときに、上に、左側に書いてあります鋼材の抵抗力が常にこの山型の破壊力を上回っているということが必要になります。この鋼材の抵抗力は、先ほどシャルピー衝撃試験で示したように、中性子を浴びると右側にずれてきますので、右側、すなわち高温側にずれてきますので、中性子照射を受けた、例えばこの図でいくと薄い水色で示してあるような材料の抵抗力が、この破壊力と交差ししないということを確認するということが重要になります。

具体的にこれをどのようにやっているかということについては、ちょっと今日は時間の関係で省略させていただきますが、ここで重要になるのは、材料面からいくと、この水色の線がどこまで来るかということになります。それについて我々はどのように管理しているかということについては、次にお話をさせていただきます。

中性子照射脆化の対応としましては、脆化をしっかり進行を監視していくということと、将来にわたってどのような挙動を示すか、脆化を予測していくということが重要となります。これについては日本電気協会の J E A C 4 2 0 1 という規格、原子炉構造材の監視試験方法というものにて規定をされております。

まず、監視なんですけれども、これは原子炉圧力容器内に同じ鋼材で作成した監視試験というものをあらかじめ装荷しておいて、あらかじめ定めておいた時期に取り出して、先ほど御説明させていただいたシャルピー試験を実施して、どの程度脆化が進んでいるかというのを測定しております。それから、脆化予測については、鋼材の化学組成、なぜ鋼材の化学組成かといいますと、先ほどお話ししましたように、銅などの不純物元素があると、溶質原子クラスターというのをたくさん作ってしまって、脆化が進むというものがありますから、使っている鋼材の化学組成、それから中性子照射量を用いて脆化予測法を使って、脆化量を予測評価しております。

右側に、脆化監視と脆化予測の関係が示されております。横軸が中性子照射量、縦軸が脆化量で、赤の点で示されているのが監視試験による実測値です。監視試験の場合は、あらかじめ定められた時期ということなので、ポツポツと離散的に結果が出てくるということになります。一方、脆化予測は式を使って評価しますので、連続的に脆化挙動というのを予測していくことができるということです。赤と赤の点の間に脆化評価式というのがありますけれども、これが脆化予測法で評価した予測結果を模式的に示しております。実際に評価に使う場合には、これにマージンを加えて、要するにより脆化が進んだというふうに仮定をして予

測値というものを出して、この予測値を使って先ほどの破壊評価をやっているということですので、破壊評価の中には安全側のマージンが見込まれているということになります。

じゃ、次、お願いします。

これが、じゃ具体的に監視試験をどのようにやるかということを模式的に示したのになっておりまして、右下に横長に棒状のものがあると思います。これはすごく長いので、上下2段に分けて書いてありますけれども、これは左右につながった非常に細長いものというふうに考えてください。これがキャプセルになっておりまして、ここにいろんな形の試験片を入れて、特にシャルピー試験を数多く入れて、左下、左側の図、ちょっとすみません、これ非常に小さな図で申し訳ないんですけども、原子炉圧力容器の内側に *c a p s u l e* と書いてある絵があるところがあると思うんですけども、そこに入れて運転中、中性子を浴びるようにしております。

圧力容器の内側に入れておりますので、キャプセルの方がたくさん中性子を浴びるということになります。したがって、例えば20年の時点でこのキャピセルを取り出して評価をした場合には、原子炉圧力容器の内側よりもキャプセルの方がたくさん中性子を浴びていますので、例えば40年若しくは60年というような期間を運転したときの中性子照射脆化の度合いを監視試験によって評価できるということになります。監視という言葉だけを聞きますと、今の状態を見ているように思われるかもしれないんですけども、実際にはキャプセル、内側に入っていますので、監視試験をやった結果というのは、将来こうなるだろうというものを実測によって把握しているというものになります。これが一つのポイントになりますので、御理解いただければと思います。

じゃ、次、お願いします。

このような形で脆化予測、脆化監視をしているんですけども、じゃ長期運転に向けてどのような事項について検討したらいいかということについて、ここで整理をしております。

まず、一つ目、運転期間の延長に伴って中性子照射量が増えることで、新たな脆化メカニズムが発現しないかというのがございます。

二つ目が、脆化予測というものが、運転期間が長くなれば照射量高くなりますので、この高照射量で対応できるのかと。

それから、監視試験を継続的に実施できるのかと。これは、監視試験というのは試験片を入れて破壊して評価をしていますので、運転期間が長くなったときに試験片が果たして足りるのかと、そういうことになります。

それから、4番目が、ちょっとすぐにイメージ湧かないかもしれないんですけども、評価対象部位の拡大への対応ということになります。運転期間が長くなると中性子照射量が増えていくわけですが、その今評価している上下の部分の中性子の照射量も少しずつ増えてきますので、そこの部分に対しても評価が必要となってくる場合があるということで、ヨシン領域の上限に評価が必要となる範囲が拡大していくので、これにも対応できているかということになります。

これに向けて対応していくわけなんですけれども、日本よりも長期運転を早く取り組んでいるアメリカにおいて、この問題についてどのように対応しているかということについて先に御説明をさせていただきます。

次、お願いいたします。

これがアメリカにおける検討を示したものとなっております。

まず、新しい劣化事象が出てくるかというものに関して言えば、アメリカが60年から80年の運転期間の延伸をするとき、セカンド・ライセンス・リニューアルするときに、米国の原子力規制委員会が潜在劣化事象の検討というのを行いました。これはEMDAと呼ばれる活動になっております。60年超運転時において、原子炉圧力容器に限らず、材料劣化について考慮すべき事項、これについて材料劣化に詳しい各国の専門家を集めて検討をしました。その結果、少なくともその時点の知見においては、60年を超えたからといって、想定しなかった新しい劣化メカニズムが発現してくる可能性というのは想定できないのではないかと。ただし、飽くまでもその時点での専門家の知見を集めた判断ですので、継続的に知見を拡充していくことは重要であろうという結論になっております。これらの検討結果をアメリカは2回目のライセンス更新の審査ガイド等に反映をしております。

この検討はアメリカの原子炉規制委員会が行いましたけれども、各国の専門家が参加しているということで、下に書いてありますけれども、日本からは当所の曾根田と私が原子炉圧力容器について、それから原子力安全システム研究所の有岡さんという方が1次系耐圧バウンダリーの機器の検討にも参加しておりまして、米国規制委員会が行った活動でありますけれども、この時点での各国の専門家の共通認識がここに表れているというふうに考えていただければと思います。

2回目のライセンス更新について、アメリカはもう続き、80年の認可が出ておりますけれども、このときの審査というのは、申請者が各劣化事象について60年運転までの取組をベースに、着実かつ責任を持って継続して管理を実施していくことができるかということ

中心に審議がなされました。中性子照射脆化についても審議において大きな指摘事項はなく、事業者の対応方針が基本的に承認されています。

例えば継続的な劣化監視というものに関して言えば、一度使って破壊された監視試験片を再生して炉内に新たに装荷する技術とか、それから米国の場合は、複数のプラントの監視試験をうまく組み合わせて行うという、統合化監視試験プログラムというのが既に実用化されていますから、これを活用していくというものになっております。

じゃ、次、お願いします。

さらに、アメリカは80年運転認可、幾つも出ましたので、今度は80年後に運転はできるか、100年に向けて運転はできるかということについて、やはり米国規制委員会が、これは今年の10月の頭、ついこの間やったものなんですけれども、ワークショップを開きまして、80年超運転を実現するために軽水炉構造材に対してどのような研究開発を行っていく必要があるかについて議論をしました。このワークショップについても当所からも参加をして、実際に議論に加わっております。

原子炉圧力容器の照射脆化については、以下の研究開発を継続的にやっていくということが確認されました。一つは、脆化予測の高照射量への対応ということです。米国の予測式はR. G. 1. 99 rev 2と呼ばれるもので、これは実は1991年から改定されていない予測式になっていまして、最近ちょっと高照射量の監視試験結果が出てきたときに合わないということが言われ始めていて、さすがにこれは改定していかなくちゃいけないだろうということで、今アメリカではこれの改定に向けた検討が進められております。二つ目は、継続的な監視試験の実施ということで、80年から更に100年まで運転期間延びますので、しっかり監視試験ができるかということについて確認していく必要があるだろう。それから、先ほどお話ししましたように、評価対象部位も上下に拡大していきますので、これについても確認をちゃんとやっていくということです。

このワークショップでは原子炉圧力容器以外の劣化事象についても議論をされましたけれども、基本的にどの劣化事象についても、80年を超えても各劣化事象について大きく対応を変える必要はないということで確認はされました。ただし、着実に知見を拡充し、例えば原子炉圧力容器であれば、今御説明したような研究開発課題について研究開発を着実にやっていく必要があると、そのような形でまとめられたというものになります。

では、次、お願いいたします。

じゃ、それについて国内ではどう検討しているかということについては、次にお話をさせ

ていただきます。

まず、運転期間の延伸に伴って新しいメカニズムを発現する可能性があるかないかということに関しては、中性子照射脆化のメカニズムである照射損傷に関する研究を当所を中心に継続的に行っております。ただ、1機関若しくは例えば日本でいえばJAEAさんの研究を行ったとしても、その数少ない機関だけで全てが分かるわけではありませので、国際的な活動へも参加して知見の拡充を続けております。例えばIGRDMという、日欧米の照射損傷の専門家によるメンバー制の会議体というのがあるんですけれども、これに毎年参加してここで議論を行いながら、研究課題を見付けていくというようなこともやっております。

それから、二つ目が、脆化予測が高照射量まで対応できるかと。これに関しては、監視試験を継続的に実施するとともに、監視試験に対するナノレベルでの組織分析というものを行って、これらの結果をJEAC 4 2 0 1の脆化予測法の継続的な検討の改定に使っていただいております。

それから、三つ目が、脆化監視を継続的にできるかということに関しては、まずJEAC 4 2 0 1にもともと長期運転時の監視試験の取り出し時期というのがしっかり規定されていませでしたので、これについての規定を追加して、柔軟な監視試験ができるように改定を行っているところになります。それから、小型試験片技術、当所ではミニチュアCTマスターカーブ法というのを開発していますけれども、このような技術を開発して対応していこうというふうに考えております。

それから、評価対象部位の拡大については、評価対象部位の選定やそこで使用されている材料、照射条件に関する検討を開始しております。ただ、これについては、照射量の絶対値は小さいので、脆化そのものが問題になるというふうには今予想されておられません。ただし、しっかり管理していくことは大事なので、どのような材料が使われているか、どこまで照射を浴びるかということをしかり把握することが重要だというふうに認識をしております。

今日は、この中でも照射損傷に関する研究の継続、それから脆化予測は高照射量まで対応できるか、それから試験取り出し時期に関して具体的な活動について、次に御説明させていただきます。

監視試験が継続できるか、それから脆化予測がきちっとできるかというのは、最終的には電気協会の規程、ここに書いてありますJEAC 4 2 0 1に反映されていきますので、これがしかり改定をしていけるかというのがポイントになります。この規格は1970年に初版が改定されました。以後、改定を続けていたんですけれども、2007年の改定で中性子

照射脆化量に関する予測法というものを、アメリカの先ほどお話しした R. G. 1. 99 r e v 2 という予測式から、最新の研究脆化に置き換えるということで、国内脆化予測法というのを取りました。国内脆化予測法というのは、後で御説明させていただきますけれども、当所が監視試験片に対してアトムプローブというものをを用いてマイクロ組織分析を行って、そこで生じる照射損傷のメカニズムを反映して作った予測式になっております。この予測式についても定期的に改定を行っておりまして、2013年に追補版を出しております。さらに、2024年版の追補については、監視試験取り出し時期の改定ということで、今、技術評価を行っているというところになります。したがって、J E A C 4 2 0 1 については、日本では継続的に改定は実施されているということになって、これからも続けていくということになります。

次、お願いします。

ここに J E A C 4 2 0 1 の 2 0 0 7 年以降の改定の概要を示してあります。今、口頭で御説明したとおりですので省略させていただきますけれども、2024年の追補版では、先ほどお話ししましたように、監視試験の取り出し計画について長期運転に対応できるように改定を進めております。それから、脆化予測式の改定に関しては、202X年ということで、まだちょっとはつきりしていないんですけれども、前回の2013年の追補版で原子力規制庁さんからコメントを受けた内容を反映するとともに、その後に出てきた監視試験結果を基に脆化予測式を高度化したものを改定版に入れようということで、今勉強会の中で審議をしているところになります。

じゃ、次、お願いいたします。

脆化予測の高照射量への対応ということについてどのように行っているかといいますと、現行の国内予測法の中性子照射量の上限というのは、 $1.3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ということになっております。国内の PWR、PWR の照射量は大きいですから、PWR で得ようと思いますと、PWR の 60 年運転時の中性子照射量は $5 \sim 8 \times 10^{19}$ 程度ということで、一応現在の脆化予測法でも 60 年運転までは対応できるんですけれども、この脆化予測法を作ったときのベースとなる監視試験のデータというのは、 2×10^{20} を超えるようなものはほとんど出ていなかったもので、やっぱりここに関する知見の拡充が必要だというふうに考えております。至近の監視試験片の中性子照射量は 10^{20} を超えつつありますので、やはりこれをしっかり分析して取り込んでいくということが重要となっております。この値というのは大体 60 年運転時の照射量に相当しますけれども、過去の試験の照射によって得られた

規格を作ったときの高照射量のデータも超える値になっていますので、ここをしっかりと見ていくというのがポイントになるというふうに考えております。

次、お願いいたします。

これが脆化予測法の継続的な対応をどのようにやってきたかということを示したものです。真ん中に三つの図が並んでいます。これは横軸がアトムプローブという装置を持って分析したときの溶質原子クラスターという照射欠陥の堆積密度を示していて、縦軸が脆化予測式によって評価をした脆化量ということになります。基本的にはこの堆積率の平方根と脆化量というのが直線関係にあるということを用いて、電中研が開発した予測式というのはできているんですけども、2007年のときには一番左の図にあるようなデータを使って予測をしておりました。2013年はその真ん中の図、2017年版は右の図ということですので、データ点数が増えているということ、それから高い値、要するに高い値というのは中性子照射量が増えている状態での値という、これらのデータが増えているということが御確認できるのではないかなと思います。実際の数としては、2007年に作ったとき以降、約30回分の実際の監視試験のデータを追加して、特に高照射量の値を取り込むことによって予測精度を上げてきておりますし、同時に劣化メカニズムに関する知見の拡充も行ってきたということになります。

次、お願いいたします。

当所の作っている今国内の予測式というのは、ナノスケールでの変化というのに着目して作っている脆化予測式ですので、今後も脆化予測式の高精度化を図っていくためには、ナノスケールの変化に対する知見の拡充というのが必要となります。中性子照射脆化に関して言えば、ナノスケールでの組織変化というのは溶質原子クラスター、先ほどからお話ししていますように、不純物元素が集まってきてクラスターという固まりを作っていくというものに起因するというものと、もう一つはマトリックス損傷ということで、中性子によって結晶構造の乱れが生じるというようなもの、この二つが主要因になっています。

マトリックス損傷に関して言えば、不純物がたくさんあって溶質原子クラスターがたくさん出てくるような材料に関してはそれほど寄与は大きくないんですけども、今の日本で再稼働している若しくはこれから再稼働する可能性があるプラントというのは、比較的新しい年代に造られたプラントになりますので、不純物の量が少なく、特に一番影響を大きく与える銅に関しては非常に少ないように抑えられていて、低銅材と呼ばれるようになっています。このような低銅材については、溶質原子クラスターによる損傷が余り出ませ

るので、相対的にはマトリックス損傷などが大きくなるということで、これらについてしっかり見ていく必要があるということです。これらについてしっかり見ていくために、原子炉圧力容器の監視試験の残材より試料を採取して分析を行っております。以下、このアトムプローブトモグラフィーと収差補正機能を有するTEMによる分析について、どのような分析を行っているかというのを簡単に御説明をさせていただきます。

これがアトムプローブによる溶質原子クラスターの分析ということです。アトムプローブは、材料中の原子の3次元的位置と種類を同定できる分析法になっております。本日はちょっと原理については御説明を割愛させていただきますが、どのような分析結果が得られるかというものについて、右側に図として示してあります。右側、下の図はちょっと回転させていますけれども、上が固定する形で分析結果を示しております。

この横長の絵というのは、大体直径が30ナノメートル、長さが200ナノメートルぐらいというものの試料の中の原子の配列を表しております。ですから、非常に小さい領域、ナノメートルレベルでの原子の配列ということになります。この細かい点が図中にあると思うんですけども、これが一つ一つの原子一個一個を示しております。この図では銅とリンとシリコンについて示しております。主要の鉄原子を入れてしまいますとその色に塗り潰されてしまいますので、鉄の原子を抜いた形で表示をしています。

これを見ていただくと分かるように、これは中性子を浴びた材料についての結果を示していますけれども、例えば上の図とか下の図いずれにおいても、オレンジ色の固まりができているのが分かると思います。これが溶出原子クラスターと呼ばれるものになります。ですから、この数を分析することによって脆化量を推測できる理由というのが当所の予測式になっておりますので、高照射量の試料についてもこのような分析を行って、高照射量側の脆化予測式の精度を上げていくということをしているということになります。

次、お願いします。

次が収差補正機能付きの走査透過電子顕微鏡、ちょっとすみません、名前が複雑で申し訳ないんですけども、これを用いたマトリックス損傷の分析というものになります。この設備は、従来型の透過電子顕微鏡、TEM、TEMと呼ばれてはいますが、これによる結晶構造の分析に加えて、高速度での組成分析が可能な装置という特徴があります。

左側の図は、マトリックス損傷の典型例である転位ループと呼ばれるものの分析手法を新しく今開発しているというものです。この図は原子炉圧力容器材料そのものではなくて、純ニッケルと純アルミニウムに対して実験をしているものなんですけれども、この右側の図が

TEMによる従来法の分析ということで、矢印が書いてあるところに転位ループというのができていると思うんですけども、何となくぼやっとしているのがお分かりいただけるかと思います。右側がこの新しい設備を用いて今開発している分析方法で、矢印が付いているところに転位ループがあるんですけども、ちゃんとループの形で見えるというのがお分かりいただけるかと思います。このような形でこの設備を用いて、この転位ループの分析というのを高精度で、かつ簡便に行えるような方法を今開発して、これを高照射量の原子炉圧力容器の分析に活用していこうというふうに考えております。

それから、もう一つの特徴である組成分析を行えるというものに関して言うと、右側の図に示されていますけれども、右側の図の左側が電子顕微鏡像で、右側の二つ色が付いているものがニッケルとマンガンの濃度を示しているものになっています。真ん中のところにすばっときれいに水色と紫色の線が入っていると思うんですけども、ここは結晶粒界を示しておりまして、マンガンとニッケルがこの結晶粒界に偏析、集まってきているというのが分かっていたいただけるかと思います。

下が定量評価をした結果になっていますけれども、ゼロの1が結晶粒界になっておりますので、定量的にもマンガンとニッケル、その他の原子も濃縮するものがありますけれども、このような形で濃縮しているというのが分かるようなものになっておりまして、このような走査型電子顕微鏡と——最新のですね——それから先ほどお話ししましたアトムプローブというものを使って分析をしっかりと進めていくことによって、長期運転した場合の高照射量の圧力容器に対しても適切に脆化予測ができるようにしていきたいというふうに考えております。

じゃ、最後、お願いします。

これが本日の御説明のまとめとなります。

原子炉圧力容器の中性子照射脆化について、長期運転時に新たな劣化事象が発現する可能性は、現時点では少ないというふうに考えております。

中性子照射によるミクロ組織に関する知見を拡充して、脆化予測法の高度化を継続的に実施していくことによって、長期運転に対応していくことは基本的には可能であるというふうに今考えております。ただし、当然のごとく研究開発はしっかり続けていくというのが大きな前提で、今この結論になっているということになります。

少し御説明が長くなって申し訳ありませんでした。私の説明は以上となります。

(上坂委員長) とても重要で、かつ非常に難しい問題に関して、とても分かりやすく、また包

括的に御説明いただきまして、ありがとうございます。

それでは、委員会の方から質疑させていただきます。

それでは、直井委員、お願いいたします。

(直井委員) どうも新井様、御説明ありがとうございました。

私の方から、まず監視試験片の取り出し頻度、これはJ E A Cの4 2 0 1の中で規定されているのだと思うのですが、おおむねどれぐらいの頻度、エフェクティブ・フル・パワー・デイズなどを基準にして決まっていくんじゃないかと思うのですが教えてください。また、この運転期間の延伸に伴ってJ E A Cの中でどう改訂がなされているかについても教えてください可以吗。

(新井研究参事) 本日は補足説明の資料を付けておりまして、後ろの方をずっと行っていただいて……これ付いていないですかね。すみません。手前、ちょっと暗くしていただいて、見えるようにしていただいてよろしいですか。3 2 ページですかね。

まず、監視試験の回数というのは、もともとは脆化予測をしたときにどの程度その運転期間の終了までに脆化が進みそうですかというのをベースに回数は決まっていた。したがって、冒頭で御説明させていただいたように、BWRとPWRを比較すると、PWRの方が原子炉圧力容器の径が小さいので、同じ期間運転しても照射量が増える、大きくなるということなので、脆化量が大きくなるということなので、PWRの方が多くなるような評価になっております。それがこの表の左側のJ E A C 4 2 0 1、2 0 0 7と書いてあるところのΔ R T N D Tが幾つ幾つと書いてあります。これが基本的な回数の考え方になっていて、上の方が脆化が進まない、下の方が脆化が進むというものになっていますので、取り出し時期に関して言うと、下の方が回数増えているの、お分かりですよ。基本的にはこのような考え方でやっていくということになっておりますので、例えば単純に1 0 年ごととか、そのような形で決めているわけではないということになります。

(直井委員) ありがとうございます。

次ですが、照射量が増えていったときに評価対象部位を拡大するというお話がありました。1 5 ページには照射量の絶対値が少ないから余り脆化そのものが問題にならないという記述がありますが、これは同じ圧力容器の材料じゃなくて、違う部位というか、コンポーネントの脆化を評価していくということになるのでしょうか。

(新井研究参事) 基本的には同じ圧力容器なんですけれども、脆化量が増えてきますと、例えば一部、今まで評価範囲に入っていなかったノズル、ノズルというのは配管がつながってい

るような部分とかが入ってきますので、そこに使われている材料、工種でいえば、J I S というと J I S の何番という工種があつて、基本的には同じ鋼種が使われているんですけども、製造したときのロットが違ったりすると化学組成というのは微妙に違ったりしますので、それはちゃんと把握できておかないと脆化予測とかができないというので、基本的にはそこをちゃんと調べるということと、あと、照射速度も当然違いますので、それも把握しないと、例えば40年運転したときに正確に例えば幾つになるとか、60年運転したときに幾つになるという照射量が分からないので、そこもちゃんと評価する必要があるということで、脆化そのものというよりは、ちゃんと評価ができますか、そのために必要な情報をちゃんとそろえることができますかというのが一番大きな問題になります。

(直井委員) ありがとうございます。

それから、この J E A C 4 2 0 1 についてはこれまでも改訂されてきているわけですが、今後の改訂では脆化予測法についてまだ議論が続いているという状況かと思います。目標としては今年度中に改訂をしたいというような御意向なんでしょうか。

(新井研究参事) 電気協会としてはそれぐらいのスケジュールで進めばいいかなと思っていますが、その後技術評価も受けなければいけないので、どのようなタイミングになるかというのがあります。もともとは2007年の13年追補版のときの規制庁さんからのコメントを受けて、と同時に、その後出てきていた新しい監視試験の結果を入れた脆化予測式は作って、もう準備をしていたんですけども、一部昔の脆化予測式に使われていたハルデン炉で照射した試験の照射材について、ハルデンの方が正しい記載をしていなかったという、そういう問題がありまして、それについて影響があるのかないのかというような評価を規制庁さんから求められていて、その評価をしていたというのがあります。

それについて評価はもう終わって、大して影響がないということは分かっているんですけども、その後それをやっている間に新しい監視試験とかが出てきていますので、せっかくであればそのデータを入れて作ったほうがより適切な予測式になるだろうということで、またデータを加えましたので、ちょっとその意味で今ちょうど審議をしているということになります。なので、慌てて作っているというよりは、十分に準備してきたものに関して更にデータを加えて今係数とかの最適化をしておりますので、その結果を今電気協会で審議を頂いているということになります。

(直井委員) ありがとうございます。

それから、21ページ目でアトムプローブによる溶質原子クラスターの分析について御説

明いただきました。19ページのクラスター堆積率の平方根に線形の相関があるという分析については、何となく予測評価式が予想は付くのですが、マトリックス損傷の分析の方のいわゆる転位ループの観察結果だとか、溶出原子がどうやって粒界に偏析しているよというようなことは分かるのですが、分かった情報を基に、具体的に脆化予測はどういう方向で評価されるのかというところを教えてくださいと思います。

(新井研究参事) まず、マトリックス損傷については、ちょっと今日御説明していませんけれども、現行の脆化予測式にも項としては入っております。ただ、高照射量に関して言うと、溶質原子クラスターと同様にしっかりデータを見ていかなきゃいけないというのがあると同時に、マトリックス損傷に関して言うと、これはちょっと評価が正直難しかったと。透過型電子顕微鏡というのは、ある意味扱う人のノウハウとか能力によるという、ぼやっとした像が出てきていて、電子顕微鏡ですから、御存じのように原子そのものを見ているわけじゃなくて回折度を見ているので、解釈がどうしても入るというのがありましたので、少し難しい部分があつてというのがありました。今我々が取り組んでいるのは、やはりその解釈によるところが少なく、より正確にマトリックス損傷というのを評価できていくような手法として、今日御説明させていただいたような、収差補整型の透過電子顕微鏡を用いた新しい評価手法というのを作っているというものになります。

粒界偏析に関して言うと、例えばリンというのは、昔から古来、リンが偏析すると鋼材がもろくなるというのは、それは原子炉圧力容器に限らず、いろんなところで知られていたようなものなんですけれども、じゃそのようなものが本当にどの程度偏析するかというのは、非常に分析としては難しい技術であつたというのがあります。特に最近の鋼材はそのような不純物って少ないので、そのような少ない不純物が長期に運転したときに本当にどの程度偏析するかというのは、非常に技術として評価するのは難しいという問題ですので、今、一生懸命その分析をしているところで、それがどの程度進んでいくのかと。それが結果として鋼材の粘り強さ、じん性ですね、これにどの程度影響を与えるかというのが分かった時点で、脆化予測式に取り込むか、入れるか入れないかというのを判断していくことになるかというふうに考えております。

(直井委員) 分かりました。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) それでは、岡田委員、お願いいたします。

(岡田委員) 新井様、御説明ありがとうございます。

私の方は基本的なことを、分からないところをお聞きしたいと思います。まず化学組成で

すね、化学組成 10 ページ……

(新井研究参事) 10 ページですね。

(岡田委員) 鋼材の化学組成、これは最初の鋼材、照射する前の鋼材の化学組成ということでいいですか。

(新井研究参事) はい。基本的には運転中に化学組成が変わるということはありませんので、最初に作ったときの化学組成をしっかり押さえておけばいいということで、これは基本的には原子炉圧力容器のような大型構造物に関して鋼材を作る場合には、鉄鋼メーカーが製造時の溶融、溶融というのは溶けた状態での化学組成分析をしていますし、その後、板とか塊に成型した後にもサンプルを採って化学組成分析等をしていて、それがスペックとしてちゃんと購入者に提示されるようになっていきますので、基本的にそれでしっかり押さえられるというようなものになります。

(岡田委員) ありがとうございます。

私はこの圧力容器の分析はしたことはないのですが、中のステンレス鋼とかそういうのは分析したのですが、原子力の使っている鋼材って非常に高純度ですよ。

(新井研究参事) そうですね。

(岡田委員) なので、私は中性子放射化分析で分析しましたが、非常に微量で分析が難しいと実感しております。なので、この圧力容器もそうなのだろうと、非常に不純物が少なくということだろうと考えます。

この鋼材ですが、マンガンとモリブデンとニッケルが入ったと調べたら書いてあるのですが、これはこの脆化には影響しないものなんですか。

(新井研究参事) ニッケルは寄与する場合がありますので、ニッケルについては当然評価式の中に取り込んでいますし、ニッケルが組織としての変化としてどのようなところを引き起こすかというのも、分析はちゃんとしております。

(岡田委員) 分かりました。

それで、もう一つお聞きしたいのですが、11 ページのところに試験片を照射する位置で、フラックスは変わらないものなのですか。

(新井研究参事) 当然フラックスは上下方向にも、それから周方向によっても、周方向でも燃料配置がありますので変わります。それはしっかり分析とか評価がしてあって、基本的には大きく変わらない範囲、基本的には上下取りますとこういう分布に当然なりますので、この平らなところに収まるように入れておりますし、温度差についても、温度差が出ない範囲内

で収まるようにという評価を行った上で入れております。

(岡田委員) 分かりました。

最後の試験片のところ、21のところですね。このところで試験片で原子が見えるという、これは実際の鋼材なんですか。

(新井研究参事) そうですね。ただし、これは最新の鋼材をもしこれで分析すると見えないんです、銅がないので。分析すると、1個とか2個とか、若しくは一個も見付かりませんでしたということになってしまいますので、すみません、これに関してはちょっと御説明してなかったんですけども、あえてたくさん銅が入っているような模擬材の結果になっています。イメージとして……

(岡田委員) 模擬材であえて分かるようにということなのですね。

(新井研究参事) 分かるようにということです。御説明しなくて、すみませんでした。

(岡田委員) 分かりました。

最後ですけれども、電力中央研究所のような研究機関が将来を見詰めて地道に研究を進めていって、こういうふうに出してきて評価していくというのは、原子力の安全に非常につながっていくことだと思います。新井さんの説明は上手なのですけれども、一般の人たちに広報する方法ということがあればなと思っているのですが、電力中央研ではそういうことはやられているのですか。

(新井研究参事) まず、基本的に例えばマスコミの方とか、取材の御希望があれば全て対応しておりまして、実際にアトムプローブの分析装置等も見えていただいております。それからあと、電力中央研究所ではオープンラボをやっておりますので、毎回入れるという、これは放射線管理区域にもありますので、ちょっと難しいところもあるんですけども、逆に管理区域に入っていない同様の設備などを使って、こういう分析ができると、こういうことに取り組んでいるというようなことも、毎回ではなくて、そのときそのときのオープンラボのテーマがありますので、ちょっと必ず毎回というわけではないんですけども、そのような形で対応するようなことも過去にやった例がございます。

(岡田委員) ぜひ一般の人たちに分かりやすく説明できるような機会があればと思います。

それと人材育成に関してですが、今後の電力中央研では人材育成はどうなっていますでしょうか。

(新井研究参事) まず、当然入ってきた職員に関しては、しっかり先輩が面倒を見ながらいくという、昔ながらの方法を取っていますけれども、インターンとかでそういう希望があれば、

ちょっと毎回これという話ではなくて、いろんな技術に関してインターンを採ったりとか、あとは、必ずしも年齢が若いというわけではないですけども、任期付きの研究員の方を入れて、その人たちにしっかり技術を身に付けていただくとか、そういうこともしていますし、あとは、ちょっと今はやっていませんけれども、アトムプローブ技術だけに限って言えば、東大の材料をやっている研究室の学生さんに来ていただいて、共同研究という形でアトムプローブ使って研究していただいたりとか、そういう形で可能な範囲で人材育成というのはやっております。

(岡田委員) 是非すばらしい研究を続けていってほしいなと思いますので、よろしくお願いします。

(新井研究参事) ありがとうございました。

(岡田委員) 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。

今のに関連して、1年ほど前、日本テレビのニュース番組でアトムプローブとシャルピー試験出しましたね。

(新井研究参事) すみません、私がささやきました。

(上坂委員長) 出られていましたね。

それから、これも4年ほど前だったのですが、原子力材料の国際会議が電中研であって、ポスターセッション、私も出席したのです。ポスターセッションを回ったら、もういっぱいの方々が電中研のアトムプローブの結果を出しまして。ですから皆さん共同利用で使っているのだなと。

(新井研究参事) そうですね。できるだけ皆さんに使っていただけるようにしようというふうには思っていますし、電中研のアトムプローブ利用の特徴としましては、アトムプローブ、先ほどの絵とかのところにナノスケールの結構分析とか出ているんですけども、針をちゃんと作れるかというの、実は勝負なんです。針の先端が50ナノとか、そういう針を使っていきますので、針の形が悪いと、あれは高電圧を掛けて原子一個一個を飛ばしていくので、針の先端って物すごい力が掛かっているんです。作り方が悪いと一個一個じゃなくてぽこっと取れたりとかして、針が壊れるというのもあります。

原子炉压力容器に関して言うと比較的作りやすいんですけども、ステンレス鋼だったりニッケル基合金というのは針を作るのが物すごく難しいんです。なので、普通、例えば大学でこのようなものを扱ったときというのは、ドクターの学生だったりマスターの学生が作る

ということになるんですけれども、どうしてもそうすると作る針のクオリティにむらができるとか、継続して作れないというのがあるんですけれども、電力中央研究所の研究職が自らやる場合もありますけれども、ちゃんと技術スタッフを抱えていて、安定的に分析ができるという体制を作っています。

それは、最初にアトムプローブ入れるときからこの予測法を作るということを前提にやりましたので、最初にその体制を作ったというのがすごく大きいかなと思っております。それができているので今の電中研があるという形ですので、やはりそこがポイントかなと思っていて、それは単に電中研だけができればいいというわけではなくて、世界的にそのようなことができた方がいいに決まっていますので、例えば昔エネ庁さんの委託事業の中でステンレス鋼の分析をさせていただいたときは、電中研だけではなくて原子力安全システム研究所も同じような技術持っていましたので、そこをベンチマークみたいなことをやって、基本的にこういうふうに分析をすれば同じ結果が得られるとか、そういう条件のすり合わせとかをやっていますし、世界的にもそのような活動をやられていて、そこをやっていくことによって、どの方が分析してもそこそこ同じ結果が出るというような形になるようには努力します。それはもう国際社会の研究のグループとしては常に続けているということになります。

(上坂委員長) ありがとうございます。

次に、質問ですが、13ページの米国における検討。ここは米国だけでなく、そこに世界が加わって検討されていると思います。この一番下の監視試験片の再生技術と統合化監視試験プログラムです。統合化のところは複数のプラントからの監視試験のデータを統合するというふうにおっしゃった。この再生技術と統合化をもうちょっと具体的に。どのように統合して、どういうふうなデータやあるいは評価式を改良されているのかを教えてください。

(新井研究参事) まず、再生技術なんですけれども、すみません、前の方に試験後の写真が載っているような……そこでもいいですかね。シャルピー試験しますと、見て分かるように試験、二つに割れてしまいます。この割れた試験片のその割れた片方のところを成型してきれいにして、両側に鋼材を継ぎ足して、この真ん中にノッチを切ることによって、同じ形の試験片を得ることができます。継ぎ足し方についてはいろいろなやり方があって、例えば日本では今電子ビーム溶接とかレーザービーム溶接というのをやっています。アメリカはもうちょっとざくつとしていて、スタッド溶接って分かりますか。電気抵抗溶接。両側からぱーんと電圧掛けてやるという、かなりアバウトな方法をやっています。

これについても、接合の仕方が悪ければそこから壊れてしまう可能性もありますので、どの程度のものであればその影響が出ないかというののもちゃんと評価をしています。日本の J E A C にも試験片の再生は規格としてはもう取り込まれていますし、アメリカはもう当たり前のように使っています。意外といい加減な溶接をしても大丈夫というのが結果としては出ています。ただ、日本は、やっぱりそういうことに関して日本人は真面目なので、電子ビームとかレーザービームできれいに溶接をして使うという形を取っています。日本については、日本原電の東海第 2 発電所の 40 年高経年化技術評価のときに、監視試験片の再生で対応していきますということは盛り込まれているので、監視試験の再生についてはもう実用化されている技術というふうに見ていただければと思います。

統合化監視試験プログラムというのはアメリカでできたものなんですけれども、もともとアメリカの場合はすごく古いプラントもあって、監視試験がまともに入っていないプラントとか、そういうプラントもあったんです。ですが、だんだん理解が進んでいくにつれて、やっぱり中性子照射脆化というのはちゃんと監視しなきゃいけないんだ、じゃ監視試験が入っていないプラントについてどうするんだという話が持ち上がったときに、たくさん監視試験片が入っているプラントを親プラントとして定義して、そこと、先ほどのように化学組成が大きな影響を与えていっていますので、化学組成が似ていて、かつ中性子を浴びる速度というのは、出力の大きい小さいのって炉心の大きさが違いますので、それによっても変わるので、それも踏まえて条件として似ているプラントについて統合化する、親プラントの下に子プラントがぶら下がるような形で統合化して、評価をしようというような形を取ったものです。

あと、それでもうまくいかないような場合には、サプリメンタル・サーベイランス・プログラムという、ちょっと今回複雑なので書きませんでしたけれども、再装荷、別のプラントに入れるとか追加照射をすとか、そういう照射をして必要なものを確保していこうというようなことが行われています。もともとはそういうためにやっていた I S P 統合監視プログラムなんですけれども、それはもう終わった話なので、今はそれをうまく利用して、長期運転時に効率的に監視試験が行えるようにということを、米国の電力研究所、E P R I を中心にそのプログラムを作成して、N R C に認可してもらっているという、そういう形になります。

(上坂委員長) 分かりました。

それから、次のページの 14 ページの下から 2 番目の矢羽根のところで、各材料劣化とあ

ります。今日はほとんど圧力容器の話です。ただ、この件のところで直井委員からの質問の中でノズルと出ていましたが、ここで言う各材料というのは、原子炉圧力容器とそこに溶接されているノズルと、それだけと考えますか。

(新井研究参事) すみません、ちょっと表現が悪くて申し上げました。このNRCのミーティングは圧力容器に限ったものではなくて、私が冒頭で御説明させていただいた6事象を含むようなものになりますので、ステンレス鋼であったりとか配管等、それからあとコンクリート等に関してもこのときは議論をされています。当然、照射量とか、照射を受けないところも例えば高温にさらされる時間が長くなるとか、冷却水にさらされる時間が長くなりますから、やっぱり劣化が進行しますので、これらについてどう管理していくかということは、当然、そこにどういう研究課題があるかというのは、ディスカッションをされていますけれども、今まで全く知られていないようなメカニズムが出てくるとか、そういう話にはならなかったということになります。

ただし、今まで無視できるような程度があったようなものが、無視できなくなってくるかもしれないというのは当然ありまして、それについてはやっぱり知見拡充をしっかりと、本当に、材料劣化が進んだからといってすぐ機器に影響が出るわけでは当然ないので、そのように劣化が進んだ場合に機器の健全性にどう影響を与えるのかということとか、その場合に対応策として、当然、補修取替えができる機器に関しては補修取替えをすればいいので、じゃどういう補修対策を開発しておけばいいとか、そういうことについて意見交換が行われたということになります。すみません、ちょっと表現の仕方が不十分で、申し訳ありませんでした。

(上坂委員長) それから、16から17、18、19ページに掛けて、脆化予測式の高度化が行われている。その際には18ページの真ん中にあるように、60年を超えますとこの 10^{20} n/cm^2 になるとか。この辺りのデータが少ないので加えていくということもありということ。あと19ページの方には、当然、時がたっていくとデータが蓄積していきます。こんな感じで左から右に掛けてデータの傾向の信頼性が上がるということだと思いますが、どうなのでしょう、結局この包絡していく曲線あるいは直線は変わらないけれども、その信頼性が上がっていくとデータが増えていく。そういうような高度化と考えていい。あるいは信頼性の向上と考えていいのでしょうか。また別のカーブが出てくるとかですね。

(新井研究参事) 少なくとも今の日本の予測式に関して言えば、ちゃんとミクロ組織の変化を追いつけながら作っているので、ミクロ組織の変化が急激に変わってこない限り大きく変わ

ることはないというふうに考えていて、じゃ今そのマイクロ組織の変化が急激に変わるようなことがあるかという、例えばクラスターがある照射量を超えると急激に増えるとか、でもメカニズムから考えると、基本的にはそういうことは余り起こる可能性は低いだろうというふうに認識をされているので、基本的には今のままでデータを重ねていけば、多少結果的に線で書いたときに上下したりということはあるかもしれないですけども、今の線の形が大きく変わるようなことはないかなというふうに考えております。

アメリカの場合は、R. G. 1. 99 rev 2というのは、マイクロ組織とかは置いておいて、監視試験データの要するに脆化量のシャルピー試験の結果に対して、化学組成と中性子照射量で多変量解析をやった結果できている、多項式のお化けみたいな式になっていますので、結構データに引っ張られているところが大きくて、なので、ちょっと高照射量側に行くと実際の挙動と合わないというのは今知見として得られ、それはなぜかという、その当時は高照射量のデータがない状態で作ったので、そこがどうしてもうまく再現できていないということで、アメリカは、なので、その1991年に作ったR. G. rev 2をこれから改定していかなきゃいけないんじゃないかというようなことで動きをしています。

それは前々から言われていた話で、アメリカでいえば、別の予測式を作るという動きをもう当然行われていて、これでいいんじゃないかという予測式の案も出始めているので、あとはそれについてどう作っていくかというような形で、実際にそういう形に行われていますし、国際的な活動でいえば、各国それぞれ、化学組成の範囲とかは違ったりはするんだけど、共通の脆化予測式ができないかというような活動もされていますので、そういう中に我々の知見をうまく入れていくことができれば、より日本だけじゃなくて世界的な評価にも役立つんじゃないかなというふうには考えております。

(上坂委員長) 分かりました。

その次は、やや広報あるいは人材育成に絡むのかなと思うのです。岡田委員からの御指摘もあったように、例えば7ページの図があります。ここに溶質クラスター、右側ですね、溶質クラスターとかそれから結晶粒界があるという模式図ですね。この左側には空孔クラスター。最初は1個なのだけでも、それがだんだん大きくなると、転位になっていくと書いてあるのです。もう既に後半の方の21ページには、溶質のクラスター、様々な元素ごとに見えています。それから、次のページへいきますと、ここのSTEMですけども、左に転位が見え、右に結晶粒界が見えているということ。であれば、以前は模式図でしかなかったことが今、大きく最新の技術で。これも容易に撮れる画像ではないという説明がありましたが、

非常に高度な装置とそれから慎重な取扱いによって、こういうふうに今まで見えなかったものが見えるという状態になっていると。

こういうのを図を対比して分かりやすく置くと、非常に分かりやすく、かつ、また技術で予測が明確になったというふうに言えると思うのですよ。東大の名誉教授、東大の原子力材料学の権威の石野先生が日頃おっしゃっていたのは、「見えないものを見えるようにするのが学問です」でした。まさにそれを今実現している。是非今後も広報あるいは学生へ、そういうコンテンツ、そういう成果の説明をしていただけたらと思いますが、いかがでしょうか。

(新井研究参事) 貴重な御意見、ありがとうございます。我々は常に見ているので、何となく当たり前になっていますけれども、おっしゃっていただいたとおり、昔、模式図とか、あと昔のTEMですと、TEM写真をぱっと見ても、回折像が分かる専門家以外ははっきり言って「何、これ」というようなものが、今はアトムプローブとか電子顕微鏡をうまく使えば、もっと分かりやすいイメージで人に説明することができるというのは、確かにそのとおりだと思いますので、どのような形でそれを説明していくかというのは、うちがどういう形で表に出していくかということも含めてですけれども、考えて、何か方法を考えて出せるようにしたいと思いますので、そのときにはいろいろ御助言いただくかもしれませんけれども、よろしく願いいたします。

(上坂委員長) これもコメントです。今後ですけれども、例えば21ページのように、このように原子が見えていると。そうすると今度この動きですね。これが更に中性子が当たって空孔ができると。そのダイナミックスですよね。そういう観察研究も今レーザーや放射光を使って行っていると思います。私も4年前までは電中研、QST、SACRAですね「X線自由電子レーザー」の方々とこれをどう画像化しようよというような研究をやっていました。というのは、例えば物の強度を見ると、静止画像で見ただけじゃなくて、振らせてみてその振動数見ないと分からないということがあります。だから、是非ミクロが、静止画像が見えたことはすばらしいと思うので、次の段階としては更に動きを見せるといいですか。そういう方法もあると思うので、是非そういう最先端の原子力の基礎の研究の方も進めていただければと思いますが、いかがでしょうか。

(新井研究参事) ありがとうございます。

どうやってバジェットを確保するとか、いろいろありますけれども、次の段階としてはやはりそういうところにチャレンジしていくということが重要ななと思っています。

動きに関して言うと、実測ではないんですけれども、大次元計算とか使って実際に、これ

はコンピューターの能力によって規定されてしまう部分は多いんですけども、ある領域だけを取ってみれば、中性子が当たったときに原子がどういうふうに動いていて、最終的に、非常に短い時間ですけども、ある時間で安定的な状態になったときにはどうなるかというようなことは、シミュレーションとして見せられることはできるようにはなっていますので、やっぱりそれと実績を組み合わせていくということかなと思います。

それで、当然コンピューターの能力というのはどんどん上がっていていますので、それとやればなかなか面白いかなと思いますので、そういう研究も、実際うちはナノレベルの計算をやっている人間もいますので、うまく組み合わせて、そういうことと最新の分析装置に取り組んでいて、うまく説明できるようなものが作ればいいかなと思います。

御助言ありがとうございました。

(上坂委員長) そういう結果が出ますと、まさに若い方々が夢を持ってこういう分野に入ってくれると思いますので、是非よろしく願いいたします。

(新井研究参事) はい、承知いたしました。

(上坂委員長) 私からは以上ですが、ほかの委員から御質問がないですか。

それじゃ、どうも御説明ありがとうございました。

(新井研究参事) ありがとうございました。

(上坂委員長) 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御説明をお願いいたします。

(山之内参事官) 今後の会議予定についてでございます。

次回の定例会議は、日時11月5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、議題については現在調整中でございますので、原子力委員会のホームページなどでお知らせさせていただければと思います。

以上でございます。

(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。

御発言がないようですので、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—