

核融合研究開発基本問題検討会（第19回） 議事録

1. 日 時 平成16年2月24日（火）14:30～16:30

2. 場 所 中央合同庁舎第4号館 4階 共用第2特別会議室

3. 出席者

〔核融合研究開発基本問題検討会構成員〕

玉野輝男（参与）、畦地宏、居田克巳、今川信作、植弘崇嗣、大塚道夫、岡野邦彦、小川雄一、菊池満、高津英幸、寺井隆幸、長崎晋也、藤原正巳（座長）

〔招聘者〕

奥野清（日本原子力研究所 超電導磁石研究室長）

和田仁（物質・材料研究機構 強磁場研究センター長）

〔核融合専門部会技術WG構成員〕

桂井誠、岸本浩、松田慎三郎

〔文部科学省〕 山口専門官

〔内閣府〕 井出主査

4. 議 題：

（1）核融合研究開発の基本的進め方について

（2）その他

5. 配付資料

資料検第19-1-1号 超伝導線材の現状と展望

資料検第19-1-2号 核融合炉用超伝導コイルの開発

資料検第19-2-1号 核融合研究開発基本問題検討会（第18回）議事録

6. 議事内容

1) 超伝導線材の現状と展望について、資料検第19-1-1号に基づき、和田仁氏より説明がなされた。

2) 本件に関し、以下の質疑応答があった。

【小川委員】 核融合炉という意味では、イットリウム系で二十数テスラのマグネットを使った概念設計をアメリカでやっています。それから、原研はビスマス系でやっています。それで、ビスマス系、イットリウム系については、核融合にどう応用できるのか、非常に興味があるのですが、そのときに考慮しなければならない一つの観点が、低放射化という点です。まず1点目の質問は、ビスマス系で銀なしという可能性がどの程度今探られているのかということです。それから、ビスマス系について、先ほど丸棒で示されましたけれども、普通のシート状の線材とどの程度質が違うのか、どういう観点で丸棒を出されたのか、お聞きしたいと思います。

イットリウム系に関しては、日本だとISTECが一生懸命やっているのは存じあげているのですが、世界的には今どのようになっているのかを教えてくださいたいと思います。

バナジウム系については、低放射化という意味では非常に有意義ですが、 V_3Ga を含めて、この辺の開発及びその見通しはどうか、教えてくださいたいと思

います。

【和田仁氏】 まず非銀の線材を検討しているかということですが、今の段階では、マトリックス材料として、銀にかわるものは見つかっていないと思います。それよりも差し当たりは、銀は機械的に弱いものですから、これを強化するための検討がよくやられています。非銀のものはまだ物質として適当なものが見つかっていないと思います。

ですから、私の守備範囲かどうかよくわかりませんが、放射化に関しては、なるべく低減するというのとシールドリング、それから、設置の仕方など、その管理の仕方ですね。それで差し当たりは対応を考えるのではないかなと思っています。

私の線材という守備範囲から言うと、この点では今のところ、銀以外のいい材料が見つかっているかという、見つかっていません。

それから、ビスマス系で丸棒の件ですが、これは非常に重要な理由があります。ここでは、どれくらいまで特性が上がっているかということをお示ししたいと思ったので、自分のところにありますトップデータになるものを示しました。私のところでトップデータというのは、世界でほぼトップデータですから、どれくらいまで到達しているかというので出したのですが、これはNMR用に開発しました。NMRでは、マグネットを巻くのに、丸棒でないといけないのです。非常に精密に巻くために丸棒であることが必要です。普通だったら多分テープにすることが多いと思うのですが、わざわざ丸棒にしています。ですから、テープとして作っても、この程度のものは特性としては出ると思います。これはNMR線材だから丸棒になっているというのが回答です。

次に、イットリウムについてですが、私の調べた範囲では、ISTECは100メートルぐらいのものをつくろうというところを目標に置いておられるようです。それで、電流容量としては、77Kの液体窒素温度で、38Aという値が出ているようです。それから、ドイツのTHEVA社という会社は、これで短尺テープのものを売りに出しているようですが、私の持っているデータでは、10センチメートルで10万円するようです。いずれにしても、まだ短いので、核融合などに関しては、この先何ステップもやってスケールアップしないといけないと思います。臨界電流密度特性は先ほど申し上げたように、素晴らしい値が出ています。ただ超電導層が薄いですから、電流容量という面では大きい値になっているわけではありません。

V_3Ga は、先ほど言いました太刀川さんという方が開発され、当時は Nb_3Sn をしのご特性を示していたのですが、やはり太刀川さんがチタン添加した Nb_3Sn というのを開発されて、これが V_3Ga を上回ってしまったのです。さらに、現在ははるかに上回るレベルまで来ていると思います。ですから、私のところにある V_3Ga を用いたマグネットは18.1Tですが、それより上のマグネットには、もう使われていません。

【小川委員】 でも、逆にいうと、そこがらだったら V_3Ga でコイルはつくれるのですか。

【和田仁氏】 はい、サイズなどの問題を別にすればつくれます。ただ、 V_3Ga のGaが高いことなどから、現在の開発は Nb_3Sn の方に行ってしまうと、そこでストップしています。

【寺井委員】 2点お伺いしたいのですが、11ページのグラフで、Bi2212丸線と書いてあるのは、銀シースの線材だと理解してよろしいですか。

【和田仁氏】 はい。

【寺井委員】 11ページのグラフの電流密度というのは、断面積をどういうふうに見ているのでしょうか。超伝導部分だけではなく、導体の断面積で見ているという理解でいいですか。

【和田仁氏】 ほぼ超伝導の部分で比較しています。

【寺井委員】 それからもう一点、イットリウム系のRABiTS法でつくっておられるテープ線材ですけれども、例えばこれをコイルのようなものに巻くということを考える場合に、これは層状になっていて、銀の安定化層が一番上にありますけれども、先ほどのシース線材に比べれば、もうちょっとコイル形状に巻くには工夫がいるのかなという気がするのですが、そのあたりの見込みはいかがですか。

【和田仁氏】 これも要請との関係で発達してきていまして、差し当たりは、私どもはNMRに関する開発をやったわけです。そのときには、高い磁場、2.3～5 Tを何とか出すことが目標にありまして、その場合は中心の小さいコイルだけをビスマス系で作ります。そういう開発と核融合の場合は大分要請が違います。ですから、違うR&Dをやらなさいといけない。答えを申し上げますとやっていないということですね。十分にはやっていないということです。

【寺井委員】 ただ性能として非常に高そうなデータが出ていますね。それからもう一点、目標とする電流密度はどれぐらいが必要でしょうか。もちろんこれは目的によると思うのですが、例えば核融合炉の超伝導マグネットを想定したとき、11ページのグラフの電流密度で、どれぐらいのところが目標値なのか、もしわかりましたら教えていただきたいと思います。

【和田仁氏】 それは奥野さんの方から回答していただきたいと思います。

【寺井委員】 わかりました。私は、このグラフの単位で10の4乗ぐらいを超えるところかなと理解していたのですが、あとで結構です。

【和田仁氏】 1000ぐらいですね。10の3乗です。

【松田委員】 2点ありまして、一つは、製造技術について、日本が非常に進んでいるというお話ですが、それはなぜそうなったかということをお聞きしたいと思います。それからもう一つ、12ページの耐ひずみ特性というのは、これはひずみゼロのところをノーマライズしてあるので、例えばNb₃Snと比べた場合も、先ほどのRABiTSテープの方が特性としてはいいというふうに見るわけですね。

【和田仁氏】 そうですね。これはノーマライズした値ですから、ここで大小が出ているのが、そのまま臨界電流密度ではないというのは、もちろんそのとおりです。同じ磁場で比べて、高い磁場にいけばいくほど酸化物の方がずっと上にいるという関係になっています。

【松田委員】 11ページのグラフと両方合わせて判断すべきだということですね。

【和田仁氏】 はい。

【松田委員】 製造技術の方についてはいかがでしょうか。

【和田仁氏】 そうですね。もともと物をつくるのが得意だったということも多分あると思うのですが、一つには、原研とかKEKとか、こういう超伝導体を必要とするような大きなプロジェクトがずっと存在したということが非常に大きいと思います。常に新しい材料を開発するということに対する駆動力がかかっていたというのが非常に大きいと思います。

もう一つは、材料の研究というのは、比較的スモール・サイエンスから始めることができるというので、みんながとりかかりやすいという面を持っているということもあるのではないのでしょうか。

それからもう一つ、始めるのも早かったですね。私の先輩の太刀川さんは、昭和40年以前からこれに取り組みましたけれども、今考えてみると世界的にも早い方だと思います。

【松田委員】 どうもありがとうございました。

【菊池委員】 マグネットというのは、核融合にとっては非常にキー・コンポーネントになっていて、和田先生がおっしゃるように日本が一番進んでいるというのは、逆に核融合を進める上で、日本がリーダーシップを世界的にとりやすいということになっていると思います。そういう面を見たときに、将来、高温超伝導系を進めるとしたときに、核融合の閉じ込め方式もたくさんあって、どれで頑張るかというのはいろいろ意見があるわけですが、マグネットもこれだけありますと、戦略的に日本が選択していく線材の種類というのは非常に重要なファクターになるかと思っています。総合的に考えられたときに、和田先生はどれが一番有力だなと思っておられるのでしょうか。

【和田仁氏】 非常に重要な質問ではないかなと思うのですが、まず一般論から言うと、高い磁場で大電流を流せるほどいいのは間違いありません。その点では、性能だけで言うと、今、見た範囲で一番性能がいいのはイットリウム系ですから、イットリウム系かなということになります。一方で、すごく大きいものをつくらないといけないという要求がございます。その他、もちろん設計が何テスラでされるかにもよります。例えばイットリウムでないと届かない磁場で設計されたらイットリウムしかないわけです。設計がどの磁場でされるかということで決まるとは思いますが、それは今ビスマスとイットリウムの間で、こっちだというほどには至っていないと思います。まだ両方とも開発要素がものすごく残ってしまっていて、その点でもどっちだとは言えないと思います。

【菊池委員】 ということは、基本的にはイットリウム系かビスマス系か、どちらかではないかなとは思っておられるわけですね。

【和田仁氏】 Nb₃Snを上回るもので今知られているのは、それしかありませんから、そうです。

【菊池委員】　それで、12ページの耐ひずみ特性について、お伺いしたいのですけれども、これを見させていただくと、Nb₃Snのひずみ特性が一番悪く見えるのですけれども、ピスマス系の場合に、特に0.3%ぐらいから急激に悪くなりますね。でも、そのレベルより下では、比較的スズに比べるとフラットなように見えるのですけれども、この耐ひずみ特性は、スズより悪いと思うのか、総体的にはいいと思うのか、それはどちらなのですか。

【和田仁氏】　このデータは信頼性という観点から見たものではないのです。これも設計の仕方によると思うのですけれども、酸化物は今の特性のままだと、絶対にひずんではいけないというぐらい、補強しておかないと安心できないと思います。それが私の回答ですね。Nb₃Snは一見変動するよう見えますが、ある範囲内に収めておけば元に戻ってくれるのです。そういう安心感という点では、まだまだNb₃Snの方がはるかに高いと思います。

【桂井委員】　今、静的な特性を主にお話になられましたけれども、実際の大型マグネットですと、周囲の外乱が加わってきますね。そういう場合の評価は短い線材ではとても不可能だと思います。そういうイットリウムとか高温超伝導について大型化した場合、外乱に対する強靱性は、金属に比べてどうなのでしょう。少し心配なような気がします。

【和田仁氏】　それも調べられてはいます。繰り返し応力をかけるとか、やられていることはやられています。ただ、いずれにしてもあまり大きい応力をかけるとすぐ壊れますし、小さい範囲でやりますので、ほぼこういう感じなのですね。あるところまでいくとガクッとくる。

【桂井委員】　もう一つ、これは次のお話になるかもしれませんが、強い磁界に対しては、やはりそれをサポートする支持構造材と絶縁物が並行して進歩しているというふうに考えてよろしいのでしょうか。電磁力でぐっと押しつけられるわけですね。従来は10Tぐらいで限度かなと昔は言われていたと思ったのですけれども、これも進歩しているのでしょうか。

【和田仁氏】　それは、完全に奥野さんの方の守備範囲だと思います。

【桂井委員】　では、あとで聞きます。

【菊池委員】　先ほどおっしゃった信頼性という面でスズが極めていいという点に対し、酸化物について、線材そのものを開発して今後何年ぐらいでスズ並みに持ってこられるという可能性はあるのでしょうか。

【和田仁氏】　今考えられているような線材の構造であれば、多分傾向はこのとおり、あまり変わらないのではないかと想像します。ですから、酸化物を使うなら、酸化物を使うための補強の仕方とか何かをむしろ考えることになるのではないのでしょうか。

【菊池委員】　どんなに補強部材を使っても、例えば0.1%とか0.2%というひずみは発生しますよね。

【和田仁氏】 しますね、はい。

【菊池委員】 そういう中でも、要するに全くひずみがかけられない状態で作らなければいけないのか、あるいは、0.1、0.2%というひずみは許容し得るのか、そこはどうでしょうか。

【和田仁氏】 それは解は多分あると思いますが、それが0.1なのか0.2なのかとか、それを決めるためには、やはり信頼性のテストをもっと充実させてやらないといけません。解はあると思いますが、そのときは多分後で話があるのではないかと思うのですけれども、補強材の量が多くなり過ぎないようにするといった方面の話もあると思います。

【小川委員】 産業応用という核融合以外の面についてお伺いしたいと思います。

低温超伝導コイルについて、 Nb_3Sn 系とか、ニオブチタンでもいいですけども、核融合関係でこれまで開発してきているものが、いろいろなところでどの程度応用されているのでしょうか。

それから高温超伝導について、実は昨年、ASC社の工場に行ってきました、あそこは非常に大きな量産体制の工場を今つくっていますけれども、日本ではそういうのはあまり聞きません。高温超伝導関係での産業応用というようなブレイクスルーが、日本及び世界で今どうなっているのでしょうか。

この2点について、産業応用という観点から教えていただきたいと思います。

【和田仁氏】 まず、低温の超伝導の応用ですけども、一番よく知られているのがMRIですね。それから、これも核融合と同じようなポジションにあると思いますが、磁気浮上列車があります。ですが、これも民生かということとちょっとどうかということがあります。超伝導は、今のところ私の理解では、半導体とかその他のものと競合する分野ではあまり応用されていないと思います。超伝導でなくてはできないという分野を見つけて、そこで応用が進んでいる。NMRなんて超伝導でないと絶対できませんから。今のところ、そういう関係ですね。

それで、酸化物及び常温超伝導といわれるものが期待される一つの理由は、そのくらいになれば他のものにとってかわる例がもっと飛躍的に増えるのではないかという面があると思います。そういうわけで、超伝導の応用というのは、今のところそれほど広がっていませんが、最近ちょっと進み始めている分野というのは、いろいろなプロセス、材料とか物質を操るプロセスですね。その例としては、シリコンの単結晶を磁場の中でつくるとか、それからたんぱく質の単結晶をつくるのを私もやっています。その他には、磁気分離といまして、水の浄化みたいな、環境関係のものが民生側で考えられている応用です。

なぜ、こういう応用が出てきたかということ、非常に間接的かもしれませんが、KEKとか原研がやる核融合等のプロジェクトでは、超伝導のマグネット自身の開発に付随した技術として、冷却技術などが発達するわけです。今言いました幾つかのプロセスは、どちらかということ小さいマグネットを使いますが、これを冷やす技術が近年、ここ10年くらい、急速に発達しました。そうすると、超伝導マグネットは、例えばヘリウムなしでも使えるという方向で発展してきて、ヘリウムがなければ、普通の実験室などでも工場でもどこでも置けるわけです。そういう面が出てきています。

それから酸化物に関する大型のプロジェクトという意味では、ISTECで送電線などを頑張っておられるようです。また、アメリカが、どこかで送電のプラントが何かをつく

りましたが、これは成功しなかったと聞いています。

【小川委員】 やはり応用は厳しいのですか。

【和田仁氏】 そうですね。酸化物でなくてはならないという応用が見つかれば、すぐに広がると思うのですけれども。

【植弘委員】 NMRの線材と、核融合に使われるような環境での線材では、線材として持つべき性能や特性がかなり違っているのですか。

【和田仁氏】 全く違うのです。NMRの場合、永久電流モードという方式で運転いたしますから、磁場が変動しないですね。核融合の場合には、変動させるので、交流損失というものがあり、超伝導が破れる可能性があるのですけれども、NMRの場合には、その部分を見込まなくていいのです。ですから、安定化材といわれる、周りにくっつける銅の量が非常に少なくて済むなどの特徴を持っています。従って直ちには核融合に応用できませんが、 Nb_3Sn では二十何テスラまではいくよということをこれで示したと思っています。

【菊池委員】 核融合の場合、いわゆる4.2 K、4.5 Kぐらいの温度でやっている、ITERのものも20 MW、30 MWという冷凍のための負荷がかかります。冷却技術が進んだとおっしゃられたのですけれども、リアクターのエコノミクスにとってみると、循環電力でプラス30 MWというのは、随分なロスですね。

そういうものは、やはり高温超伝導で、例えば20 Kとか十数Kとか、そういうところで運転できるようになれば、少なくとも数分の1ぐらいになるとしているのですけれども、そういう領域でのマグネットの開発というのは、例えばピスマス系でやられたときにはでき得ると期待してよろしいのでしょうか。

【和田仁氏】 線材の特性だけに基づいて回答いたしますと、酸化物の特徴というのは、あまり温度で特性がそれほど変わらないのですね。ですから、4.2 Kでできることは、あまり変わらないで20 Kでできる可能性はあるのではないかと思います。それが私の回答ですね。

【松田委員】 12ページの耐ひずみ特性で、RABiTSテープの場合、マイナスの側のデータがないのですが、これは原理的に測れないのですか。それとも、たまたまデータをとっていないだけなのですか。

【和田仁氏】 正直に言いますと私は知りませんが、ただ、測るときのプローブに多分依存しているのだと思います。それが圧縮側に測れないような測り方をしたのだと思います。原理的に、この物質でできないということではないでしょう。

3) 核融合炉用超伝導コイルの開発について、資料検第19 - 1 - 2号に基づき、奥野清氏より説明がなされた。

4) 本件に関し、以下の質疑応答があった。

【藤原座長】 17ページのNb₃Alのデータは、何アンペアの導体のテストなのか。

【奥野清氏】 導体自体はニオブスズの線とほぼ同じで0.8ミリぐらいの直径のものですから、100Aとか150Aとかそのぐらいのものです。

【藤原座長】 素線のテストなのですね。

【奥野清氏】 はい、そうです。

【菊池委員】 2点お聞きしたいと思います。先ほど和田先生より、冷凍機循環電力の低減のために高温運転が可能かどうかという質問に対し、20Tなら難しいという話があったかと思うのですけれども、どのぐらいの磁場であればできるのかというのが1点です。

それから、高磁界化をした場合に、やはり今主流はケーブル・イン・コンジットという方式を使っているのですけれども、結構銅がたくさんあって、導体が大きくなればなるほどその中の応力は厳しいものが出てくるのかなと思うのですね。やはり、今後16T、20Tのオーダーになっていくときに、導体の構造自身はやはり同じようにケーブル・イン・コンジットでいくのかが2点目です。この2点を質問いたします。

【奥野清氏】 資料の18ページに磁場温度特性の絵がかいてございますが、これをもとに検討しないといけないということになります。20Kで見ますと、臨界磁場が25T程度ということで、これはニオブアルミとかニオブスズとそんなに変わってこないですね。ですから、20Kで使おうとすると非常に厳しいのではないかと思います。では、どこまで下げればいいのかというのは、まだそこまでは具体的に検討しておりませんので、この場では答えられません。

ただ、1つ言えるのは、うまい冷却方式がありません。4K付近ですと超臨界ヘリウムがありまして、その比熱でもって冷やすのですけれども、温度が上がれば上がるほど比熱がなくなりますので、安定化というのが難しくなります。20Kの高温超伝導がなぜできるかという、今度は高温超伝導自身が持つ比熱が使えるようになってくるのです。そうすると、4Kと20Kの間はどうやって冷やすのかということになりますが、そこはまだはっきりと見えてこないところで、中間温度はこれからいろいろと検討していかないといけないということなのです。

そういった意味で、冷却構造あるいは冷却方式から検討しないといけないということで、22ページの課題のところでは二重丸で示してあるのです。その辺が進めば、あるいは10Kで例えば10何テスラができるとか、そういうのはあるかもしれません。

ケーブル・イン・コンジットについては、やはりニオブアルミにしか適用できないものだと思っています。高温超伝導の場合は、そういう概念ではなくて全く別のものを持ってこないといけない。今言ったような冷却構造も含めて、理論的にも構造的にも違うものを持ってこないといけないと考えています。

【菊池委員】 アルミであれば16Tクラスまでケーブル・イン・コンジットでいけるというイメージですか。

【奥野清氏】 それはかなりの確度でいけるのではないかと思います。

【桂井委員】 先ほどお尋ねした件ですが、16、20 Tになった場合、周辺の補強構造部物が非常に大きなものになってしまって、マグネットが巨大化して重量が大変大きくなってしまわないかと素人考えには思うのですけれども、そういうことはいかがなのですか。

【奥野清氏】 14ページにその辺のところの課題だけを示していますが、右側の図を見ていただくとわかるように、この断面の構成比は、構造物7、導体2、絶縁物1で、今ここでいろいろ導体の特性を云々していますが、実はこれは10分の2でしかないわけで、ほとんどの部分は構造物で決まってしまうわけです。ですから、高強度の構造物をこれから開発するという事は、炉をコンパクトにするという意味で非常に重要なことだと思っています。

ただ、一方で構造物の開発というのは、おそらく超伝導線材の開発以上に難しいものだろうと思うので、例えば、今検討されていますCSコイルを取り除いて、むしろその内側にコイル全体が入っていくような低アスペクト比のコイル構造ですとか、その辺まで含めてトータルで検討していかないと、この辺の解を見つけていくのはなかなか大変ではないかという気がします。

【桂井委員】 その16 T、20 Tという言葉は頻繁に出てきますけれども、これは構造物の設計に解があるとって皆さんおっしゃっているのですか。それとも、これはまだ今後の研究によるのでしょうか。

【奥野清氏】 例えば、大きくすれば解はあります。現に設計例を原研の場合、幾つか示していて、その中では多少構造物の特性も上がるということは含めてございますが、設計としては閉じております。ただ、なるべくコンパクトにしようといった場合に、この辺が非常に問題になるということです。

【岡野委員】 その点に関係があるのですが、17ページを見ると典型的ですが、16 Tで使うよりも、例えば13 Tで使った方が電流密度が上がる上に構造物も減るのですね。だから、コンパクトなコイルを使うという観点だったら、16 Tは本当に最適かどうかかわからないかもしれないという気はします。実際、コスト解析をするときに、構造物は応力に従って増えるというような入れ方をすると、磁場を上げるのはあまり得にならないケースが多いですね。ですから、16 Tを目指すというのは非常にいいことだと思うのですが、16 Tが最適かどうかはまだわからないというのが本当のところではないかと思えます。

それから、15ページで、これはちょっと言い過ぎではないかと思われる点を確認したいのですが、12 T用のニオブアルミ導体の開発は完了していて、技術も実証されていると書いてあるのですが、そうすると、現在の計画が進んでいる重点化装置とか、あの辺は12 Tでも設計できてしまうのですか。

できるものなら12 Tでつくってほしいと思うし、何か問題があるなら確認したいと思っています。

【奥野清氏】 すみません、これはまず12 Tではなくて13 Tなのですが、それを訂正するのを忘れまして。

13 Tを出そうとするとそれなりに大きさは必要となります。今の重点化装置にそれだ

けのスペースがあるかどうか、私は設計に直接はタッチしてないのでわかりませんが、おそらくここで言ったような安定化とか、あるいはクエンチ対策とか、構造材とかを入ると、今の大きさでは13 Tのニオブアルミ導体を使ったTFコイルというのは設計できないのではないかと考えています。

【菊池委員】 説明しておきますと、重点化装置の場合は、主半径が3 mクラスというJT-60の既存設備を使うという条件から考えますと、12 TのNb₃Alの超伝導マグネットというのは磁場が出過ぎてしまうのです。それでやりますと、コストも大幅に増えてしまって、性能が臨界クラスを大幅に超えるような性能になりかねないのですけれども、一方でコストは今考えているものには入ってこない。単純にブレイクイーブン・クラスでやればNb₃Alで7 Tのマグネットさえあればいいということになります。一般的な傾向として、トカマクで主半径が3 mクラスで非常に強磁界の12 Tクラスのマグネットで設計すると、どうしてもアスペクト比がぐっと高い領域に入っていくざるを得ないので、そういう面でもなかなか答えがないという状況になっています。

【今川委員】 先ほどのケーブル・イン・コンジットのまま高磁場化するののかという質問にも絡むのですけれども、図で言うと14ページ目のもので、開発要素はいろいろありますということで、これ自身は私はいいいと思うのですけれども、今設計で成立しているというところが1つポイントになっていると思うのですが、ITERだって決して遮断のときの温度上昇というのはマージンがあるわけではないと思います。つまり電流密度も上げて磁場も上げるということは、かなりチャレンジングなことだと理解しています。

具体的な方策というのが、今そうはっきりしていないのではないかとと思うのですが、例えば遮断の時定数を短くするとか、そういう手はそこだけとるとあり得るのですけれども、実際は遮断の電圧が上がってしまうとか、ほかのデメリットもありますので、そういう意味ではかなり難しいと私は認識をしておるのですけれども、先ほど奥野先生が説明されたのは、できるというようなニュアンスで伝わってきたものですから、やはり電流密度を上げて磁場も上げるというのは非常に難しいんだというところは、もう少し説明をしておかれた方がいいのではないかとと思うのです。それが1点です。

もう1点は、高温超伝導の核融合用のマグネットの開発についてですが、21ページ目の資料になると思うのですけれども、これも世の中がこれからどう変わるか、わからない面がありますけれども、今、高温超伝導材で、高磁場で、大電流で4 Kで使うという用途としては、やはり核融合だけだと思うのです。そうしたときに、例えば77 Kで使う、産業応用として目指すような高温超伝導の研究というのはやられている部分があるのですが、核融合のためだけに4 K、もうちょっと高いのかもしれませんが、低温で高磁界で大電流というものをやらないといけないというのは、これはかなり状況としては厳しいのだということも、これはコメントですが、それは気をつけないと、かなりそういう意味では頑張らないと、高温超伝導で核融合用の大型マグネットはできない、できないという語弊があるので、難しいというところはコメントとして申し上げておきたいと思えます。

【奥野清氏】 ありがとうございます。ニオブアルミの場合は、例えばいわゆるケーブル・イン・コンジット導体で対応できるかということ、高温超伝導に比べればかなりははっきりと課題もわかっているし、これまでの開発実績もありますし、その辺から考えると、かなりできるのではないかと考えております。ただ、開発要素がないということで

はなくて、22ページに書いてありますように、まだまだ検討しないといけないところはたくさんあります。特に安定化が重要な課題であります。

例えば、ITERの導体設計でも、すべて100%わかっているわけではないですね。わからないところは、エンジニアリング・マージンということで、安全側で設計しているわけです。例えばクエンチ時の温度上昇にしても、安定化の問題にしても、さらに突き詰めていくと、銅の量はもう少し少なくてよいのだとか、そういうところは出てくると思うのです。その辺のところを、あらゆるところから少しずつ集めないと、なかなかトータルの電流密度を上げるというのはできないと考えています。

そういった意味で、ケーブル・イン・コンジットですと、今も言いましたように非常に課題がはっきりしているので、今後、その辺を重点的に研究していけば、少しは対応策が出てくるのではないかと期待しています。できるとは言い切れませんが、かなりの確度でできるのではないかと気がしています。

それから、コメントの方はそのとおりで、そのように検討させていただきます。

【松田委員】 ちょっと確認ですけれども、先ほど20Tの電磁力でもつかもたないかという話がありましたけれども、一方、和田先生の資料にもありましたけれども、電磁力で J_c （臨界電流値）が劣化するか、しないかという話は、これはあくまで歪みを通してということだと理解していいですね。そのとき、例えば奥野さんの資料の13ページにひずみ特性の図があるのですけれども、その「 J_c （A/mm²）」の「mm²」というのは、ストランドの断面というふうに思っていますね。

【奥野清氏】 そうです。ストランドの断面の中で、しかも銅部を除いた部分です。

【松田委員】 そうですか。例えば銅の割合を大きくすれば、線材そのものはひずみを受けないにはできるけれども、これは銅部を除いたものなのですね。

【菊池委員】 先ほどの岡野委員のコメントで、磁場を高くするよりは電流密度が上がるのだったら磁場の低いところでやった方がいいと言われましたが、これは多分ベータが上がるということを仮定した場合ですね。ベータが全く上がらなくても、磁場が低いところで設計した方がいい、安くなるよという意味ではないですね。

【岡野委員】 それを含めてですけれども、ベータの限界とリンクさせて最適化するとどこにいくかはまだよく検討していないですねという意味です。今は、ベータも磁場も両方が高い方がいいという話になっていますね。

【菊池委員】 多分、基本的にはベータが上がれば低い磁場で設計するし、上げられなくなると、唯一の答えは磁場を上げるしかないということになっていくので、順番としては、もちろんまずベータの方が優先度が高いと思いますけれども、出力がやはり出てこないというのは困りますので、ベータが上がらなければ磁場を上げることになる。これはロジック的にはそうなるのだと思います。

【桂井委員】 ちょっとそのロジックは、話が違うのではないかと思います。ベータを上げると制御の問題が出てくるわけですね。磁場を上げれば、この構造設計とか構造材の問題が出てきて、両方とも上げたいけれども、それぞれ何かまだ不確定要素があるというわけですから、ベータが上がらなかったから高磁場に行くという話でなくて、高磁

場もまだ不確定要素があるというので、両方とも上げることに関しては不確定要素があるから、そう順序づけられる話ではないと思います。

【菊池委員】 でも、ベータさえ上がれば、そんなに高くない磁場で十分な出力を出せます。例えば電中研のCRESTみたいに N が 5.5 まで上がれば、あのサイズで 100 万キロワットの発電所ができるわけです。

【桂井委員】 それは非常に制御がうまくいったというケースですね。

【菊池委員】 もちろん、そのとおりです。ですから、制御つきの意味でベータが上げられたらという意味です。それができない場合は、当然ある限界のベータ値があるわけですから、それで最もコンパクトになるところに、磁場とサイズをスキャンした上で設計点をもっていくことになると思います。それは、総体的には磁場が少し高いところに移行するだろうと思っているわけです。だから、磁場としては 16 T からそれ以上の領域が必要になるだろうなということを想定して、磁場のマグネットの開発を進めざるを得ないと思います。

それはいいのですが、お二人の先生からお聞きして、特に奥野室長の方からは、高温超伝導で核融合炉のマグネットを構成する場合に、さまざまな問題がありそうだというのがかなり明確になったかと思います。そういう面で和田先生にちょっとご意見をお聞きしたいのは、どういうバランスでやっていくべきなのかという点です。

我々は高温超伝導で頑張るんだという方向で、かなりの重点を置いて超伝導開発をすべきなのか。それとも奥野室長がおっしゃっているようなアルミだったら、和田先生のところで開発された方法で結構いけるだろうし、それを進めるべきなのか。もちろん、タイムスケールにも依存するだろうと思うのですが、そここのところの感覚を教えていただけないでしょうか。

【和田仁氏】 私のキャパシティを超えていると思うのですが、別な答え方をしますと、先ほど核融合関係のプロジェクトで、酸化物をやってもそれを大きいマグネットに使うのは難しいから云々という話がありましたが、核融合で強磁場で使うことができるということは、要するに機械的強度が強い線材が開発されるということですね。そういう線材ができれば、その波及効果はほかにいっぱいあると思うのです。例えば、磁気浮上列車のマグネットとか S M E S (超伝導電力貯蔵システム) のマグネットとか、こういうものは強磁場で強い応力に耐え得る線材ができれば使われる可能性があるし、そこで使われれば、またそれがどこかにはね返ってくるという関係で、波及効果は私はあると思います。でも、選ぶのを私に言えと言われてもちょっと難しいですね。

もう一つ言いますと、酸化物の開発があるところでなぜ止まっているのかという点です。まさにこの点で核融合が頑張りたいと思います。例えば我々のところで Nb_3Al なりピスマスなりの素線をつくったとしますね。素線に関するテクノロジーを開発したとします。そうすると、これをスケールアップしないといけないわけです。スケールアップするということは、大抵の場合は、工場の生産プロセスを 1 回占有するようなことを企業に対して要求しないといけない。ここは非常に高く、必要な予算が急増してしまう。核融合のプロジェクトは、多分、そここのところを担っていることになっていると思うのです。いろいろな成果が出ていますけれども、よくよく見ると、生産技術という面ですごいブレークスルーを幾つかやっておられると思います。その 1 つの特徴は、非常に大きいプロジェクトの中で、普通ならなかなか次のところまで行けないというところを試すことがで

きるという部分があり、そこが期待するところだと私は思っています。

【玉野参与】 資料の最後のページの開発ステップのチャートのところですけども、そこに十二、三年後の「導体の選定」というのが書いてございますけれども、これが十二、三年後だというのは、逆算するとこの時期に決めなければいけないということでしょうか。それとも、このくらいの開発期間があれば、今やれそうなことは大体開発できるのではないかという予測から来ているのでしょうか。

【奥野清氏】 先生もよくご存じのように、加速案のスケジュールというのがございまして、それに間に合わせるようにするには、ここで最終決定をしないといけないということです。開発に十分な時間があるかどうかという点については、むしろ間に合わせるように人とお金を集中的に投資しないといけないというのが、私たちマグネット屋としての意見です。

5) 今後の予定等について、藤原座長より説明があった。

以上