

核融合研究開発基本問題検討会（第18回） 議事録

1. 日 時 平成16年1月27日（火）14:30～17:00

2. 場 所 中央合同庁舎第4号館 4階 共用第4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、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、藤原正巳（座長）

〔招聘者〕

岸本泰明（日本原子力研究所プラズマ理論研究室長）

小西哲之（京都大学エネルギー理工学研究所教授）

福山 淳（京都大学大学院工学研究科教授）

〔核融合専門部会技術WG構成員〕

桂井誠、岸本浩、高村秀一、西川雅弘、三間囿興

〔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18-1-1号 トカマク理論・シミュレーション開発研究の展望

資料検第18-1-2号 核燃焼プラズマ統合コード構想

資料検第18-2-2号 核融合研究開発基本問題検討会（第17回）議事録

6. 議事内容

1) トカマク理論・シミュレーション開発研究の展望について、資料検第18-1-1号に基づき、岸本泰明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。

【高村委員】 途中から来たのですけれども、岸本さんのいつもおもしろい話に大変感激しました。これまでのスタンスというのは、プラズマ物理、数学などの学術研究をベースにしているのですけれども、これから核融合研究として炉の開発を進めるにあたって、システムとしての健全性などのエンジニアリングに関する事柄が非常に重要になってくると思います。特に、お話にもあったように非常に自律的であるということで、工学の立場からするとアクチュエータが非常に限られている。そういう中で、何かが起こったときに、例えば、どこかから不純物が飛んできたり、ダストが落ちてきたりして、ディスラプションに至るかもしれない。そういうものが現実の問題としては非常に重要になってくるわけですね。

そういうものに対して、シミュレーションというのがどの程度の力を持つのか。そういうことが実際にシミュレートできれば、それに対して外部の制御が何らかの形で機能するわけです。その外部と内部の自律的な動きがカップルする。現実の問題としてはそういうことが起こってくると思うのですね。そういうものに対し、シミュレーションとして役に

立つ情報を提供できるのかどうか、何かお考えがあればぜひ聞かせていただきたいと思います。

【岸本泰明氏】 大変重要な質問であり、かつ私自身、原研にしながら、なかなかそういうところに貢献していないということも事実でして、そういうこともあって今日の発表資料は、その視点を持ちたいということを含めて書かせていただきました。

一番最後に、「資源配分を含めて10 - 20年の開発戦略が重要」と書きましたけれども、特に大学の方々の場合には学術に基礎を置くわけです。したがって、こういうジャイロモデルをベースにしたような話というのが、アメリカを特に中心に非常な勢いで進んでいるわけですが、それに対してこういう戦略が必要だと思ったのはまさにその点で、今、高村先生がおっしゃられたことの中に、実は極めてたくさんの学術的な要因も含まれていて、それをやるべきだと考えています。

例えば、非線形MHDの高ベータ・ディスラプションというものを書いていますが、一例ですけれども、ぜひあと10年間ぐらいかけてそういうコードを開発できればと思っています。これは、例えば核融合研等でも、非常にMHDのノウハウをたくさん持っておられて、例えばディスラプションが発生したときに、ディスラプションが発生する基本的なメカニズムに関する理論がありますが、それがさらに大きく変形して、壁のどの部分をヒットして、そこにどの程度の熱をもたらすかというのは、同じ非線形性でも、今までの理論で取り扱った非線形性よりもさらに非線形性が高く、壁との相互作用という状態になります。したがって、ここで書いたことというのは、そのジャイロモデルと云った粒子性ということとは別の路線として、ぜひそういうコードを目指したいと考えております。

ダイバータというのは、原研とか大学、それから外国等でもいろいろ開発されて、中性粒子とか不純物のミックスしたような原子過程、分子過程というようなことも含まれています。それで、最近、我々のところでも、原子過程、分子過程を取り入れたようなシミュレーション研究も、そういうことも視点に置いて進めています。

ただ、それは、開発戦略あるいはその重要性というものを多くの方がきちっと認識した状態でないと、小さいグループがやっていたとしても途切れることがしばしばです。そこをぜひ何とかしていきたいと思います。ぜひ、そういうところを広い視点でやりたいと考えています。

【三間委員】 私も、随分進んだものだと思って感心して聞いたのですけれども、ここで一つ私が議論を呈したいのは、岸本先生の一番最初のビューグラフに関係するのですが、ITERと国内重点化トカマクというのは、おそらくプラズマの物理実験としては最後の実験になりそうだという提案がありまして、その次は実証炉だというわけですね。だから、おそらくその間をつなぐのは理論・シミュレーションであろうと私は思うのですけれども、その辺の見通しが立つのでしょうか。

特に、そのポイントとして、規格化ベータの話が話題になって、規格化ベータを高くしないと経済性のいいトカマク炉はできないという議論がありまして、それは重点化装置とITERとの組み合わせでやるのだという話なのですが、それを組み合わせるときに、おそらく理論・シミュレーションが決定的な役割を果たすと思います。その辺について、理論・シミュレーションに任せておけという意思表示みたいなものが欲しかったのですが、いかがでしょうか。

【岸本泰明氏】 資源配分を考慮していただくという条件つきのもとに、ある程度任せただけであれば、ということかと思います。三間先生の質問はちょっと難しいのですけれども、おそらく先ほどの高村先生のご質問とも関連していて、どれぐらい真剣にやる

のか、あるいは、どう云った開発戦略のもとでやるのかということかと思えます。

【三間委員】 具体的には、規格化ベータがどこまで上がるかという話で、最終的にはバーニング・プラズマで、なおかつその規格化ベータを上げる必要があるのですが、それを国内重点化トカマクによってある程度見通しをつけるという計画だと思っているのです。だから、そういうバーニング効果を入れたような形で規格化ベータをどこまで上げられますかという点については、やはり理論・シミュレーションの結果を待たなければいけないのか、それがどれぐらいの手当てでどれぐらいのスパンで可能なのかを、教えていただきたいと思えます。

【岸本泰明氏】 三間先生のご質問は、それがいつごろ、どの程度のレベルで予測できるのかということですが、例えば、圧力があるためにMHDモードが発生して、それが発生したときに非線形ループがどうなるか、燃焼状態にあるプラズマがどうなるかとかいう質問だと思えます。それを模擬するときに、今日は階層性ということをしている申しましたけれども、物理の階層性も階層性なのですが、戦略の階層性というのが重要ではないかと思えます。例えば非線形ループを最もスピーディーかつエレガントに模擬する手法というのは、福山先生がお話しになられますけれども輸送コードで、そういうコードの中に拡張性を持たせてMHDイベントも予測するというような方法で模擬できます。これは、おそらく現段階でもあるレベルではできます。それで燃焼プラズマでベータがどこまでいくとか、ある程度の見通しは立つのだと思えます。

ただ、問題は、それがどのレベルで確証を持ったソリューションであるかということで、それを言うためには、今度は階層性のより深いところでさまざまなバックアップ体制をとっておかないといけないと思えます。

例えばDT燃焼下で新古典テアリングモードが起きて、同時に、燃焼プラズマですからTAEのような高エネルギー粒子駆動の揺らぎも発生していたとします。そうしたら、そういうものがカップルしたときに一体何が起きるのかというのは、単純にはわからない話だと思えます。ですから、基本的にはITERのグループも含めて、そのあたりの輸送コードレベルでの一定の見通しは持ちつつも、しかし、燃焼がそのエネルギー源としてループに影響を与えている場合もあれば、燃焼を介してMHDの揺らぎそのものが新古典テアリングモードの発生に影響を与えている場合もあって、その場合は非常に複雑なカップリングになると思うわけです。

だから、そういうところをどこまで予測して担保をとるかというのは、階層の深いところでの答えだと思えるのです。ですから、それを担保しないと次に進めないぞと言われたら、あらゆる計画が困ったことになるのではないかと思えます。レーザー核融合しかりだと思えます。

3) 核燃焼プラズマ統合コード構想について、資料検第18-1-2号に基づき、福山淳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。

【高村委員】 大変まとまった話を聞かせていただいてありがとうございました。まず第1点目として、ITPAの件でご指摘があったのですが、これは大変重要なことで、この検討会の人たちもあまり認識されていないのではないかなと思うのです。というのは、中間報告書案の中に、残念ながらITPAという言葉が一文字もあらわれていないのです。全くあらわれていない。驚くべきことですね。それは、皆さんにぜひ認識

していただきたいと思います。

2点目は、先ほど岸本さんも開発戦略ということをおっしゃったのですが、福山先生はそういう意味ではかなり開発戦略的なお話をされたと思うのですが、日本の場合、特に何かやはり特徴を出していかないといけないのではないかなと思うのです。そうでないと、いわゆるグローバルスタンダードというのは米国の後追いになってしまうという、非常にジェネラルなパターンになってしまうおそれがあるわけです。何か日本として特徴を出していくということをお考えなのか、あるいは、そうではなくて共通的にやって、国際協力でやっていくというお考えなのか、その辺についてコメントをいただければと思います。

3点目は、一番最後に人材育成云々、それから核融合研にかなり人材が偏っているとかご指摘いただきまして、私もそのとおりだと思います。これは理論・シミュレーションだけではなくて、いろいろなところでそういう努力はしないとけないと思うのですが、何となく内輪でやっているというところがありますので、他分野の人をどうやって引きつけるかを考える必要があります。他分野の人を全面的にプラズマの理論・シミュレーションの方に引き込むというのは無理だと思うのですが、関心を持ってもらうというか、先ほど「サイエンティフィック・ディスカバリー・スルー・アドバンスト・コンピューティング」という言葉がありましたけれども、特に私が期待したいのは「エンジニアリング・ディベロップメント・スルー・アドバンスト・コンピューティング」ということです。要するにもっとエンジニアリングのところ目をつけて、制御の人たちに興味を持ってもらう。つまり、制御というのは非常に広い分野があるわけですね。非常に自律的なものに対する制御というのは、新しい学問分野になっていくのではないかなという予感がするのですが、制御の人たちを取り込んでいって興味を持ってもらうとか、そんなことがあってもいいのではないかなと思います。

【福山淳氏】 2番目の「特徴を出す」ということですが、今、欧米ももちろん統合コードと言っているわけですが、実際には、欧米の方は今までの既存の輸送コードをベースにやっつけているわけですね。我々は、要するにいろいろなコードを、例えばコアの輸送コード自身も入れ換えられるような形でということで、まずデータのインターフェイスを共通化、標準化しようということをお考えで、この前の日米のワークショップのときにも提言しましたが、アメリカとかはそういうことは考えていないようです。

ですから、そういうところをなるべく早急にやっつけていきたいと思いますが、コアの輸送コードも特定しないような一般的な形でやっつけていくという点で、当面は特徴を出せるのではないかと考えています。

それから、他分野の方を呼ぶということですが、この前の日米ワークショップでも、計算科学の人に来ていただくことはしています。制御の方を呼ぶ方は、多分、輸送モデルのアンビグイティが高い段階でやってもらっても、ちょっとやりにくいような気がするのですが、もう少し固まってからだったら、制御の方にも入ってもらえるのではないかなと思います。

【三間委員】 ITERのデータ解析には、こういう統合コードがおそらく必要だと思うのですが、福山先生のグループというか日本でやったものと、それから米国、ヨーロッパでやるやつとがあって、それらを寄せ集めてやるのか、あるいは、どこが一番いいものを採用するようなことになるのか。その辺のやり方は決まっているのでしょうか。

【福山淳氏】 それはI T P Aで話は薄々は出ていていると思います。例えば、定常運転の運転シナリオで、今、コードの比較をやり始めようとしていますけれども、そういうところで生き残ったものがメインに使われるのではないかという気はします。ですけれども、まだ1つでやるのか、複数各極でやるのかというところまで議論しているわけではないと思いますし、実際問題として1つということはありません。

多分、I T E Rのセントラルチームが1つ持って、各極が幾つか持っているという形になり、1つに統一されることはまだないと思います。

【三間委員】 I T E Rのデータがデータベースとして公開されるのですか。

【福山淳氏】 それは多分間違いはないと思います。

【三間委員】 それに対して、各国がそれぞれで解析コードを持っていて、それで個々に解析するというのですか。

【福山淳氏】 そうなるのではないかと思います。

【三間委員】 その結果で、またもう一度各国で協力をして結論を出すような話もあるのですか。結論があるのかどうかよくわからないのですけれども。

【福山淳氏】 結論に近いものは出さないと次に進まないのではないかと思います。

【藤原座長】 装置をつくらない方のサイトにデータ解析センターを置くという話がありますが、あれはどういうイメージだとお考えですか。

【福山淳氏】 データ解析は別にセンターをつくる必要はないと私は思います。遠隔実験のセンターという意味だったらまだありますけれども、それも、もともとは各極に置くとかいう話もあったぐらいですから、1つだけというのは少しおかしな話だという気がします。

【菊池委員】 こういう統合コードシステムというのは、日本は比較的遅れていて、おそらくI T E Rの中で、ヨーロッパよりはアメリカのコードシステムの方が有力かなという感じは確かにしていて、こういう形でやっていくのは日本として非常に大事なことだと思うのですが、一方で、結局ユーザーがたくさん増えないとだめなわけですね。つまりウィンドウズのOSでも同じですけれども、アップルのOSの方がよかったと思っていた人がいるわけですが、ウィンドウズの方がユーザーがどんどん増えていったがために、結局負けてしまっているというところがあります。それと同じで、いいコードシステムもユーザーが増えないと、結局、こういう汎用ツールというのはなかなかいわゆるグローバルスタンダードにならない。そういう面では、何かいい戦略をやらなければなりません。

原研でも、T O P I C SとかO F M Cというコードシステムを持っていますけれども、結局、アメリカの人が使ってくれているのはA C C O M Eぐらいで、T O P I C SとかO F M Cというのは、アメリカにはゴールドストーンがつくったO F M Cがありますし、なかなか全世界に使ってもらえる共通コードにならないですね。

そういう面で、やはり何らかの世界戦略がないと、一つ一つは大変いいコードだとしても、グローバルスタンダードにならないと思います。そこを福山先生はどんなふうにお考

えでしょうか。要するに、よそに負けない程度に頑張る、国内でも使えるシステムを持っておくという視点であればいいのですけれども、世界のグローバルスタンダードとしてこういうコードシステムを輸出しようと思うと、何らかの戦略がいるかと思います。

【福山淳氏】 国内に関しては、小さな実験装置とか、あるいはLHDとか、そういうところにも使えるようにしたい。LHDの方とは、最近、データ解析をどうするかということで検討を始めています。もちろんソースとかをオープンにして、少なくとも国内では、だれでも使えるような形にもっていく。コアの部分はオープンソースにするつもりにしています。

国際戦略に関しては、アメリカにはもちろんありますし、ヨーロッパもJETを中心に割と統一されている。もちろん、カダラッシュでももう一つ別にあり、各極に3つぐらいのコードがあるという形なので、日本としてはもう少し数は少ないですが統一を図ることと、もちろんアジアに売り込むということもやらないといけないのではないかと。いきなりアメリカ、ヨーロッパにというのは難しいのではないかと考えています。

【畦地委員】 岸本さんと福山先生と両方に質問したいのですけれども、まず、岸本さんのビューグラフで、2ページの真ん中あたりに、「高次の非線形の支配する新しい物質状態」、「非線形性・自律性の制御(21世紀の科学)」という非常にチャレンジングな言葉が並んでいます。私も非常にすばらしいと思うのですけれども、私たちは、少なくとも20世紀まではこういうやり方で物事をつくり出してはこなかったと思うのですね。つまり、ほとんどの場合は線形で重ね合わせの原理が成立するという範囲内でエンジニアリングをやってきたと思います。もう少し具体的に言うと、燃焼を起こすITERと高ベータの国内重点化トカマクと2つを合わせて次のステップの発電実証プラントにいくというときに、今までのように2つあったら次にいけるんだという線形的な考えではやれないということ非常に強く認識しておられるので、こういうことを言っておられるのだと思います。ところが、これは非常に新しいパラダイムなので、今まで経験のないことが、トカマクにおいてはエネルギー開発の戦略の要になっているということを行っているに等しいと思うのですね。

先ほど、岸本さんはレーザーの場合も同じですよということをおっしゃったのですが、レーザー核融合は20世紀型といえますか、基本的には予測が成立する範囲でやろうという戦略を立てているのに対して、トカマクの場合には、ITERと国内重点化トカマクに加えて、もう一つ複雑系の根源的理解があるんだということをもっと全面に出して、一体何ペタFLOPSのコンピュータが必要で、それを開発するには幾らかかって、どれくらいの時間がかかってということもやはり戦略の中に組み込んで、それでエネルギー開発をしていく必要があるのではないかと。それがコンピュータの部分だけではなくて、非線形性、自律性の制御の物理的理解も含めて、そういう戦略の要として提案をされる必要があるのではないかと。思います。

岸本さんはちょっと遠慮げに、それなりの予算が投下されればできますということをおっしゃったけれども、もう少し腹をくくって、必要なことを全面に出して主張されないと、発電実証プラントまでの道が必ずしもつながっていないように思えるのですけれども、その辺はいかがでしょうか。

【岸本泰明氏】 畦地先生ならではのご質問のような気がしますし、非常に重要な視点です。個人的な考えはありますが、原研の立場でどこまで言っているのかわかりませんが、

【菊池委員】 計算機の資源というのは、いわゆる計算科学というレベルで、他の学問分野も含めてどんどんコンピュータシステムは伸びていくと思うのですね。だから、畦地先生は、核融合がコンピュータの高性能化を引っ張らなければいけないという意識でおっしゃっているかと思うのですけれども、おそらくそうはならなくて、今回地球シミュレーターが引っ張ってくれてあれだけのものができたわけですね。それは、核融合にも大変役に立っていて、だからこそこういうシミュレーションができていているという部分があるわけですね。むしろ、我々は計算機科学の進歩の恩恵に浴するという状況だと思います。

ただし、核融合で、岸本室長の説明にあるようなものを進めていくには、福山先生がおっしゃっているのと同じで、やはり人だと思えるのですね。人材が非常に重要です。原研の理論グループというのはそんなに数はいませんけれども、非常にクオリティーの高い研究者がいて、初めてこういう研究開発が展開できているという部分があります。やはり福山先生がおっしゃったように、若くて頑張れる理論研究者をどれだけ育てられるか、そのコード開発のためにどれだけの予算を投入できるかということが非常に重要で、それは、いわゆるハードとしてのコンピュータの開発に比べれば格段に予算的には少ないと思うのですね。けれども、非常に重要なのは、若くて優秀で頑張ってくれる研究者をたくさん引きつけることができるかどうかではないでしょうか。

【岸本泰明氏】 そのとおりだと思えるのですが、今の畦地先生の質問は、シミュレーションコードのレーザー核融合における位置づけと磁場核融合における位置づけがどうなのかというところで、非常に興味あるご質問だと私は思っています。

レーザー核融合の場合には、例えば米国とかフランスが以前は核実験を行ったわけですが、何のために実験をやるかといったら、むしろシミュレーションコードをつくるために実験をやっているというようなスタンスが非常に強いのではないかなと思うのですね。特に輻射データをはじめとしたものがクラシファイド・エリアだと思いますけれども、そういう分野においてはコードをつくるのが主目的で、そのために実験がある。そのシミュレーションコードができれば、それ以降のさまざまな開発が、必ずしも実験がなくてもプレディクタブルにできる。だからコードに対する非常に強い信仰といいますかスタンスがあるのではないかなと思うのですね。

磁場核融合の場合、それに対するスタンスが成り立つかといったときに、2つあって、1つは磁場核融合が進んできた歴史的な経緯です。当然、実験をベースに進んできたし、発見がなされてきたという点がこれまでであったと思います。それからもう一つは、レーザー核融合のシミュレーションは必ずしも深くは理解していませんけれども、磁場核融合に比べれば非常にダイナミカルな現象で、プレディクタビリティがやはり高い。それに対して、磁場核融合の場合は、福山先生のご説明にもありましたけれども、時空間スケールが非常に長くて、要素要素の物理は相当わかってきていると思うのですが、全体像がどのように見えてきているかというレベルが、学術的に劣っているという意味ではなくて、本質的に相当困難性を伴うものであるというような印象があります。ですから、少しそこは違った見方をしないといけないのかなと思います。

その意味ではITERと重点化トカマクという装置があったときに、発電実証プラントを予測するというのはさまざまな困難を伴うと思います。ですから、私自身は畦地先生の考え方に近くて、ITERあるいは国内重点化装置でさまざまな現象、ディスラプションであるとか、輸送障壁であるとか、さまざまな輸送が少なくともプレディクトできて、そういうコード的な知見が深まる。そのために、さまざまな実験をむしろやっていただく。そういうスタンスは個人的にはあっていいと思いますし、今後はむしろそういう主張を展開していくべきではないかと個人的には思っています。

【藤原座長】 以前、ITERと普通のトカマクと何が違うかということが話題となり、フランスのペラが、それは同じだというようなことを言いましたね。要するに、高エネルギーの中性粒子ビームを入れて外部加熱をするシステムと、それからアルファ粒子が内部加熱するプラズマというのは、その温度や密度に比例することを除けば、あまり変わらないとペラが言って、非常に論争になったことがあります。

私は、ITERと国内重点化装置を合わせて、線形重ね合わせて発電実証プラントがシミュレートできるかというような単純な視点ではいけないと思いますけれども、内部加熱をしているプラズマというのは今までの実験にないわけで、我々は知識を持っていない。だからITERをやるのです。だけれども、この2つを合わせたら発電実証プラントが線形重ね合わせでいけないのではないかというようなことは、まだ今はそういうことを言える段階ではないと思っております。

それより、ちょっとお聞きしたいのですけれども、リアクター・クラスのをやるうとすると10ペタFLOPSのものが必要で、今は地球シミュレーターで40テラFLOPSであると言われました。これは、コンピュータのソフトウェアの方はシミュレーションの方々がやるのでしょうけれども、ハードウェアも含めて向こう15年とか20年で見通せるものなのですか。岸本さんの資料の14ページの図にあります。コンピュータの進歩というのはそういうふうには予測できるものなのですか。

【岸本泰明氏】 これは、福山先生の方が当然お詳しいわけですし、この図に関しましては、もう一度この分野の専門家の人にまずは確認したいと思います。

それを前提に、実は今回、核融合科学研究所で1.5テラFLOPSの計算ができるようになり、それに先立つ1年ぐらい前に、我々のところで大体500ギガFLOPSから、1テラFLOPSの計算ができるようになって、それまでの計算規模から10倍、ワンオーダー違った計算が可能になったわけです。最近ですと地球シミュレーターで20テラFLOPSとか、40ぎりぎり使うこともありますけれども、やはり二、三年前ですと未知の領域で想像もつかなかったことが、この二、三年の時間スケールでできるようになっています。しかも、比較的現在の知識をベースに見通せるということで、そういう意味では、その経験がありますので、100テラFLOPSとか数百テラFLOPSの計算というのは、トレーニングすれば見越せると思うのですが、例えば500テラFLOPSから1ペタFLOPSというのは、概念そのものが変わる可能性が十分ありますので、おそらく見通せないと思いますね。ですから、ここは非常に勝手なことを書いているということになるわけです。

したがって、私は最後に資源配分も含めて開発戦略が重要ということを書きましたけれども、1ペタFLOPSあるいは10ペタFLOPSの計算をする価値が見出せるかどうかという問題もあります。先ほどの議論で、若い研究者を引き込めるかということがありましたけれども、例えばジャイロ・シミュレーションがあるから、あるいは統合化コードがあって、それをよそに売り込むことで人の輪を広げるというのは、言うのは簡単ですけれども、そのシミュレーションの結果、やはり極めてイノベティブな驚くべきことが出現したり、起きるとということが前提だと思うのですね。それがないと人というのは集まってきません。

したがって、ジャイロ粒子シミュレーションというのがやはり今非常に米国も含めて勢いがありますけれども、それは、それを解くことによって、それなりにイノベティブな驚くべきことが出現するというのがベースにあり、今の規模をさらに10倍にしたときに、さまざまな揺らぎが階層的に関与して、それがカオスになるのではなくて、なおかつ自己形成するというような、構造形成の観点からも興味深い現象が起きるかもしれないという

見通しがあれば、非常に多くの研究者が参加したいと思うはずだと思います。

ですから、1ペタ、10ペタになったときに、やはり核融合に内包する物理、あるいは工学に対する面白さでもいいと思うのですけれども、そういうものを常に発信するバイタリティーがないといけないなということと、それは核融合に限らず他分野も全く同じ状況ですので、逆に500テラとか1ペタの計算機を、むしろ核融合が牽引していくということも、やりようによっては十分あるのではないかと個人的には思っています。

【藤原座長】 福山先生の資料の10ページのアメリカのロードマップでは、15年くらいで、「Full Simulation of all relevant processes in fusion systems」が可能になると書いてあります。これはコンピュータのシミュレーションのソフトウェアなりハードウェアの進歩も含め、先ほどの岸本さんの図の要するに10ペタFLOPSくらいのところまでいくということですか。

【福山淳氏】 このアメリカの例でいくと、全体を1つのコードでシミュレーションしようなんてことは考えていなくて、インテグレートド・コードで幾つかのコードに分けてやるようとしているのだと思います。私は、全部のプラズマを解く必要はないと考えており、輸送だったら輸送の法則性を出せばいい、非線形シミュレーションで法則性を出せばいいと思っていますから、ちょっと立場が違います。

【西川委員】 福山先生のお話を聞いて、炉工学の専門家としては非常に力強く思いました。というのは、6ページに記載がありますが、炉心プラズマの予測とか制御手法の開発というのは、最終的に炉工学として重要な観点だと思うのです。

それでお伺いしたいのは、その中で輸送コードの信頼性というお話が出てきましたが、輸送コードは、いつになったら信頼性が引き上げるのかという点です。実験的に言うと、スケーリングの方をそういうシミュレーションで再現するということが終着駅なのか、もっと違うようなところにシミュレーションの信頼性の最終ポイントがあるのか、教えていただきたいと思います。

【福山淳氏】 標準的なオペレーションモードに関しては、輸送モデルというのはかなり収束してきていると思っています。ただ、エッジがどうなるかというのがまだ不十分で、もう二、三年かかると思います。ですから、そのくらいで標準オペレーションについては可能だと思いますけれども、アドバンストの内部輸送障壁があるような場合については、まだもう少しかかります。10年以内には結着がつくと思いますけれども、そのくらいのタイムスケールだと思っています。最近急速に進歩していることは確かで、5年前に比べたらずっと確度は上がってきていると思います。

【西川委員】 それともう1点、岸本さんにお聞きします。シミュレーション屋さんはいつも、こういうシミュレーションについては、最近はやりの実験室天文学という方向に、要するにターゲット・オリентではなく、サイエンティフィックな方向に向かわれていっていると思います。それは、多くの人を引っ張って核融合の仕事させるといことと反対の方向です。相互作用だとは思いますが、核融合の方向でリサーチすることに対応して、その辺の矛盾はどう考えられているのですか。

【岸本泰明氏】 これは核融合研のシミュレーションセンター等の方が出られてご発言される方が、それを目的の1つにされておられるのでいいかとは思いますが、私自身は、

やはりこういうコードを作ったり、核融合のシミュレーションをやるときに、非常に強い動機を持てることが重要だと思います。プロジェクトというのは個人の動機と関係なくオーガナイズされるべきであるとは思いますが、やっているシミュレーション自身に強い動機が持てることと、そこでやっているシミュレーションが、核融合のプロジェクトそのものにももちろぬ貢献するし、より広範囲なインパクトを持つということは、やはりいろいろな人材を集めてきたり、あるいは核融合のソサイエティーの中に人を引き込んでいく観点からも、今後は重要ではないかなと思っています。

ただ、私も、核融合以外の研究を若干オーバーラップさせてやっている経緯がありますけれども、やはり必ずしも容易なことではありません。しかし、例えば今日お話しした乱流と層流の関係というような視点は、私自身は非常に強い動機になっていて、これは例えば大気、気象のシミュレーションと類似性が強く、基本となる基礎方程式系が同じであるということも含めて、その分野でも非常にホットなトピックスであるわけですね。

ですから、核融合の開発研究を進展させていく上で、そういう分野とインパクトを持つ形で連携をとりながら進めるということは、今後の核融合研究にはやはり必要なことではないかと思っています。私自身もそれを目指したいと考えている1人です。

【藤原座長】 岸本さんの資料の最後のページに、「今後10 - 20年の開発戦略が重要」とありますが、その開発戦略というのは具体的には何なのか、どういうことをしたいのか、そこを簡潔に言ってもらえるとありがたいのですが。

【岸本泰明氏】 ここで開発戦略とわざわざ書いたのは、先ほどの動機の観点からもそうなのですが、やはり2ページ目のITERと国内重点化装置、あるいはそれを組み合わせて新しいプラントをつくるというのは、確かに大きなパラダイム・シフトであり、確実性がないという畦地先生のご意見もわかります。実際、強い非線形性とか構造形成に準拠するシステムというのは、これまで必ずしも成功していないというのも事実です。

片や今の高性能定常というのは、産業レベルでエネルギーを出そうということですから、そういう観点で非常にチャレンジングで、非常にインパクトがあるというように私自身は思っています。ですから、20世紀には達成できなかった概念を核融合で達成する。そういう概念というのは十分他分野に対して発信できて、例えば1ペタFLOPSとか、10ペタFLOPSのコンピュータもそのために必要だというような戦略もあり得るかと思えます。それは畦地さんが言われたとおりです。したがって、ITERを含め、それ自身が極めて学問的な部分を内包しているという非常に大きなメリットをより前向きに生かす観点で、何か戦略がないものかという意味で書きました。

したがって、ネガティブな意味で書いているわけではなくて、場合によってはコンピュータもリードできるし、人材もリードできる。事実、核融合研究で進展した磁気リコネクション現象の知見は、天体分野で大いに生かされています。場合によっては、核融合から本来出たものが必ずしもレファーされていない場合もあります。しかし、それぐらいプラズマというのが、例えば天体分野で花盛りなわけですから、そういう機会というのは決して核融合のソサイエティーは逃がしたらいけないという意味で、資源配分も含めてぜひ考えていただきたいという意味で書いております。

【菊池委員】 藤原先生のどこまでやりたいのかという観点から、私の1つの希望というのをお話ししたいと思います。

最初、核融合を始めたときに、なかなかプラズマが閉じこもらなくて、煉獄の時代とよく言われたわけですね。その中でMHDの研究が随分進んで、かなりの部分がわかるよう

になってきたわけです。わからないところもたくさんありますけれども、かなりの部分がわかるようになってきた。だけど、そういう状況の中で、かなり核融合というのは前に進んだのですけれども、それでもトランスポートには、西川先生がおっしゃったように、まだわからない部分がたくさんあるわけですね。

ところが、このジャイロ流体のシミュレーション結果なんかを見ていますと、かなりコンピュータの中でプラズマを随分再現しているのですね。そういう面で、ITERは核融合に関しては最後の科学研究と思ったときに、ITERが終わった段階で、本当にトランスポートを今までのMHD、少なくともIdealのMHD程度に十分理解できるところまで持っていけないのかというのが1つの大きなモチベーションだと思います。その中で、かなり一般学術の中にも書き込めるものがたくさん出てくると思うので、そういうものを1つの目標にしてやっていくのかなと思っています。

そのためには、岸本室長が言うように、やはり核融合だけではなくて他の学術分野ともよく連携をしながらやらないと、我々の中だけで考えていると出てこないアイデアはたくさんあるのですね。だから、我々から発信しなければいけないし、また、逆に他の学問分野からインスパイアされるものはたくさんあって、それが実際の核融合の難問を解決するために役に立つということはあると思います。例えば、ディスラプション1つとっても、我々は戦略検討分科会で、ディスラプションは2年に1回しか起こってはいけないとターゲットを書いたわけですね。あのときは、宮先生がそのようにおっしゃって、そういう条件を設定したのですけれども、それを満たすためには、すごい予測能力がないといけないわけですね。そういう面では、プラズマの輸送の本質的な理解というのが非常に重要で、そのためにも理論というのは極めて重要な役割をするのかなと思っています。

【藤原座長】 実は理論のお話は今日初めてお聞きしたものですから、中間報告書案の方には、あまり理論・シミュレーションのことを詳しく書いていなくて、これから、今日のことを参考に少し書き足していくのですが、確かに非常に大事で、ITERをやったりして、データ解析なり、そのためのいろいろな理論の発展というのは、日本でどれくらいうまくいくものかというのは非常に心配な点です。

やはり核融合のプラズマの研究において、ITERを単にハードウェアの面だけでとらえて日本の知識を蓄積するというのは大きな間違いです。そういう観点では、理論・シミュレーションというのは非常に大事です。大事だから、先ほどのように日本がちょっと低調だという話が出てくると非常に心配になるので、ぜひとも、どういうふうにやっていくのが一番いいのかということをご助言いただければと思います。

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