

第5章

高エネルギー加速器の立場から

吉岡 正和

masakazu.yoshioka@kek.jp

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設・教授

本ワークショップやこれまでの議論および田島さんからいただいた情報などに基づき考えたことをまとめてみる。

私は次世代エネルギーフロンティア高エネルギー加速器であるリニアコライダー推進の一端を担っているが、ITER と様々な共通点があることに驚く。

1. ビッグプロジェクト
2. 地球規模の国際協力体制
3. 産業への刺激
4. 基礎技術のスピンオフの可能性
5. 技術先進国の象徴的存在、国際貢献

一方、次のような大きな違いもある。

1つは、加速器は真理探究の道具であり、その時点で究極の性能をもつものが世界に1つあればよい。そのためにこそ国際協力で建設を進めようとしている。核融合発電装置は言うまでもなく電力を生み出すための装置であり、もしそれが世界に1つしか作れないようなものであれば、意味がない。電力は「地場産業」という説明を聞いたことがあるが、大いに納得する。即ち、消費地に近いところに、必要なだけ建設可能でなければならない。もちろんITER はまだ発電装置でなくそれに至るのに必要な基礎研究のための装置だ。しかしその開発目標に「地場産業となりうるもの」ということが明確に示されていないなければならない（それは次のステップなのかもしれないが）。

2つは、加速器はその成果（性能）が一定の時間毎に厳しくチェックされ、その周期

はオーダー10～20年である。そして必要な要素技術のほとんどが特定の大型加速器に関連して開発されることが多い。TRISTANやKEKBの加速装置(常伝導も超伝導も)や超伝導収束電磁石など好例である。次のステップに進むとき、それまでに建設された加速器に対する評価を徹底的に参考にすることができる。一方核融合発電は、研究が始められてから40年を経た今も、1ワットも発電は実現されていない。ITERはその長い長い行程の一幕に過ぎない。それも主としてプラズマ燃焼の研究に重点がおかれたものだ。1人の研究者の生涯よりはるかに長い年月を要する計画にどのようなステップで評価を加えていくのか、重要な課題と思われる。

3つは、高エネルギー加速器の評価(成否)は加速器を使った実験成果も込みで言われるであろうことだ。マズイ例えで言えば「加速器はうまくいったが実験は失敗だった」とは言われず、「あのプロジェクトは失敗だった」となる。また加速器だけに限った場合でも例えば「高周波加速は巧くいったが力学口径が小さくてね」とは言われず、「あの加速器は失敗だった」となる。核融合発電の場合、プラズマの研究と炉工学の研究が高エネルギー加速器実験に比較して分離している印象を受けるがいかかなものであろうか。プラズマ燃焼のコントロールも、高速中性子からのエネルギーの取り出しも、蒸気タービンの高効率運転も合わせてうまくいかなければ意味がない。

4つは、上記各項と関係するが、加速器は真理探究の道具、ということから商業的に成立するか否かといった評価は馴染まない。核融合発電は、総合的なエネルギー戦略を考える中で商業的に成立つか、いやそれよりは、どうやったら商業的に成立つものになるのかを厳しく問わなければならない。

高エネルギー加速器が必ずしもGOOD MODELというつもりはないが、同じビッグプロジェクト推進という立場で考えたとき気付いたことを書いてみた。核融合発電研究の各局面で多くの革新的成果が出されていることも、笹尾さんたちの説明で分かった。しかしトータルシステムとして考えたとき、ITERの説明をきくときにいつも何かフラストレーションを感じるのも事実だ。それは「高エネルギー加速器との違い」をよく理解できない私自身の力不足に原因があるのであろう。さらに勉強をしていくつもりである。

(参考)核融合関連の用語解説

JFT-2

日本原子力研究所において1970年に建設が決まり、1972年から実験が始まった日本で初めてのトカマク型プラズマ閉じ込め装置。これによりソ連、米国に続いてトカマク研究の先頭グループに入ることになった。

JT60

日本原子力研究所において1978年に建設が開始され、1985年から実験が始まった大型トカマク装置。世界4大トカマクの一つで、臨界プラズマ実験装置とも呼ばれる。途中、改造を経てJT60-Uとなった後、1996年に重水素プラズマを使った実験で、D-T（重水素-三重水素）プラズマ換算で $Q=1$ （核融合反応による出力エネルギー/加熱のための入力エネルギーの比）の臨界プラズマ条件を達成した。米国のTFTR、ヨーロッパ共同体ECのJETではD-Tプラズマ実験を行い、実際の核融合出力で $Q=1$ を達成した。ソ連崩壊という政変を経たロシアでは結局大型トカマクが建設されることはなかったため、JT60-U、JET、TFTRを世界三大トカマクと呼ぶことが多い。

INTOR

国際原子力機関（IAEA）で1978年以来設計作業が進められた熱出力60万kWクラスの国際トカマク炉（International Tokamak Reactor）。当時4大トカマクの建設に着手していた4極（EC、日本、米国、ソ連）が協力して、次の実験計画を国際協力で行進しようという考えに基づいて、IAEAの本部があるウィーンを本拠地として設計作業が進められた。もともと設計研究プロジェクトとして始まったこともあり建設には至らなかったが、国際協力の枠組みはITER計画に引き継がれることになった。

ITER

1985年のレーガン-ゴルバチョフ会談において冷戦緩和の協力事業として核融合研究が取り上げられ、これにEC、日本が勧誘されて、1988年にINTOR計画を引き継ぐ形で設計研究が始まった国際熱核融合実験炉（International Tokamak Experimental Reactor）。概念設計段階、工学設計段階を経て、1998年に設計案が提示されたが、1兆円を超える建設コストに対してエネルギー開発研究としての妥当性を欠くとして米国議会は撤退を決定した。日本においても、橋本内閣は財政構造改革の期間中はITERの誘致を行わないことを決めた。その後、日本とECが中心となってコスト削減案を検討し、2001年に建設費約5000億円の

縮小 ITER 案を提示した。日本では原子力委員会のもとに設置された ITER 懇談会が各界の意見を募り、様々な議論を経て政府に対して日本誘致を提言した。それに基づいて日本政府は青森県の六ヶ所村への誘致を決定した。外国ではフランス、スペイン、カナダが誘致の立候補をしており、現在それぞれの候補地の評価と誘致の政府間交渉が続けられている。縮小 ITER への復帰を検討している米国とともに、中国も参加への意志を表明しており、今後費用分担を巡って厳しい交渉が予想されている。

LHD

科学技術庁傘下の日本原子力研究所が実用化のための開発研究として大型トカマク装置を建設する中で、文部省傘下の大学における核融合研究は、大学共同利用機関としての名古屋大学プラズマ研究所を筆頭に各地に分散して、いわゆる多岐路線で進められてきた。しかし、文部省の予算枠の中ですべての装置を大型化することは不可能であり、1986年に学術審議会は一本化の答申を出した。この報告書に基づいて1989年に新しい大学共同利用機関として核融合科学研究所が設立され、次期大型計画として外部導体系大型ヘリカル装置 (Large Helical Device) が建設されることになった。敷地造成を含む8年に渡る建設期を経て1998年に実験が開始された。トカマクと異なりプラズマ中に電流を駆動する必要がないため、本質的に定常運転が可能であることが特徴とされている。現在ヘリカル型装置としては世界最大である。

メタンハイドレート

メタンを閉じ込めた氷で、世界中の海の大陸棚および南極やシベリヤの永久凍土地帯に広く分布しており、採掘技術が確立すれば石油、天然ガスを遙かにしのぐ資源となることが期待されている。日本近海でも国家プロジェクトとして試験的な採掘が始められている。一方で、メタンハイドレートは小さなきっかけでガスと水に分解して液状化すると、大量に崩壊して海中にメタンを放出する。実際、北大西洋では液状化によって地滑りを起こした跡があちこちで発見されている。地球温暖化もそのきっかけになりうるとする予測もあり、資源採掘だけでなく、この方面の研究も大きなテーマになりつつある。

エネルギー比

発電プラントの寿命が尽きるまでの期間に生産する全出力エネルギーを分子とし、プラントの建設、維持、燃料製造等に必要全入力エネルギーを分母とするエネルギー増倍比。分子を熱エネルギーで考えるか電気エネルギーで考えるかなどパラメータの取り方によっていくつもの定義がある。

dpa (displacement per atom)

中性子照射による炉材料の損傷を評価する時に使われ、はじき出し損傷量を示す単位。すなわち、材料を構成する原子の一つ一つが中性子によって何回キックを受けるかを表すものである。キックを受けても大部分は結晶のもの位置に戻るが、時にはもとに戻らないこともある。実証炉では100 dpa 程度でよいが、実用炉では400-500 dpa 程度必要と言われている。一方、中性子照射量そのものは一般にフルエンスで示され、Mwa/m² の単位 (1年間に単位面積あたり照射されるワット数) が使われる。

ステラレーター

1951年、プリンストン大学天文学科の主任教授であったライマン・スピッツァーが水爆開発を目指すマッターホルン計画を始めようとしている矢先、アルゼンチンで核融合による発電に成功したというニュースが世界を駆けめぐった。それは結局、政治的な宣伝に過ぎなかったけれど、スピッツァーの関心は急速に制御核融合に移っていった。まもなく彼は高温プラズマを閉じ込めることによって制御核融合を目指した実験装置を作り、「星の製造機」を意味するステラレーターという名前を付けた。レーストラック型の真空容器を8の字にねじったり、コイルを螺旋状に巻くなどの工夫によって磁力線をねじってプラズマの閉じ込めを達成しようとするアイデアで、今日ある様々な外部導体系ヘリカル装置の元となる概念である。そのためヘリカル系装置全体をステラレーターと総称する場合もある。

Hモード

西ドイツのASDEX トカマクで1982年に発見された閉じ込めの良い状態をさす放電の総称。一般にプラズマを高温にするために追加熱すると閉じ込め時間が劣化する。これをLモードと呼ぶ。LモードからHモードへの遷移はトロイダルプラズマの非線形性に由来する分岐現象として理解されている。Hモードには様々な形態が存在するが、ELMy-HモードはITERの設計基準に採用されており、周辺で連続的かつ間欠的なMHD振動を伴いながらHモードの状態を維持している点に特徴がある。閉じ込め改善度が若干劣化するが、核燃焼の灰であるヘリウムを排出するためにはかえって都合がよいと考えられている。

ブートストラップ電流

トカマク装置はトーラスに沿って正味の電流を流すことによって閉じ込め磁場配位が形成される。通常のコカマク放電では、外部コイルにパルス電流を流すことによってプラズマ電流を誘起するので定常にはならない。このことがトカマクの欠点の一つといわれてきた。しかし、トーラスに閉じ込められた高温プラズマでは、磁場分布やプラズマ圧力分布の勾

配によって自発的に流れるトロイダル方向の正味の電流が存在し、これをブートストラップ電流と呼ぶ。近年ではプラズマ圧力分布の制御などを通して、ほとんどブートストラップ電流で閉じ込め磁場を維持する定常トカマクの可能性も視野に入ってきた。

DT 核燃焼実験

1990年代に行われたDT核燃焼実験は高エネルギー中性粒子ビームを入射して核反応起こしたもので、いわばバーナーで薪を燃やしている状態にたとえられる。Q=1を達成したということは、バーナーの火力と等しいだけの火力を薪が燃えることによって発生させたことに対応する。これに対してITER計画におけるDT核燃焼実験は、バーナーで点火したあとに薪が自立して燃える状態をめざすものである。

第1世代の核融合炉では最も核融合反応が起こりやすいD-T（重水素-三重水素）反応を利用することを想定している。理想的な燃料サイクルでは、トリチウム（三重水素）はプラズマ中で核反応を起こしてヘリウム灰になるとともに、反応を起こさずダイバータに達したトリチウムは回収され再度燃料として炉心に供給される。トリチウムは天然には存在しないので、ブランケットの中でリチウムに中性子を当てて生成する。トリチウムは放射性物質で、半減期約12年でベータ崩壊する（10 keV程度の電子を放出してヘリウムに変わる）ため管理が必要である一方、長期保存ができないため需要に応じて生産する必要がある。

トリチウムを使用しない核融合反応には、D-He3やP-Bなどがあるが、反応断面積が高エネルギー側にシフトしており、D-T核融合に比べて10倍以上の高温プラズマを発生しなくてはならない。しかし、核融合で発生するエネルギーのほとんどを荷電粒子が担うため発生する中性子の数が格段に少なく、炉材料の放射化や耐中性子性能の問題が大幅に軽減される可能性がある。

自己点火条件

プラズマが自立して核燃焼を維持する状況を指し、 $Q=\infty$ （核融合出力エネルギー/加熱入力エネルギー）で定義される。核分裂炉の臨界条件に相当する。日本ではQ=1を、科学的実証を示す臨界プラズマ条件と呼んだために誤解を生じやすい。Q=1は英語ではBreak Evenと表現される。現在の縮小ITER計画では自己点火条件は満たさないが、Q=10程度を目標としており、ほとんど自立燃焼に近い状態のプラズマを研究できると予想している。

ディスラプション

トカマクプラズマ中の電流が電磁流体的不安定によって突然遮断される現象。プラズマ電

流が担う大きな電磁エネルギーが短時間に開放されるため、装置全体に大きな電磁力がかかる。ITER ではプラズマ中に 20 MA (二千万アンペア) という大電流を流すので、この時の電磁力に十分耐えられる構造設計が必要である。どの程度の回数のディスラプションを想定するかによってはコストを押し上げる要因となる。

高ベータ化

プラズマの気体圧力と閉じ込め磁場の磁気圧力の比をベータ値という。トカマク型核融合炉で想定されるベータ値は平均で数%の程度である。ベータ値を高くできるということは、閉じ込め磁場の強度を下げるができることを意味し、したがって装置の建設コストを下げることにつながる。高ベータ化は核融合炉の経済性の見地から重要な要素である。

ブランケット

プラズマに直接面している第 1 壁の後に設置され、核反応で生じた高速中性子を受け止めて熱化するエネルギー変換部。核融合炉ではこの熱を取り出すことによって発電する。D-T 核融合では 14MeV という高エネルギーの中性子を熱化するとともに、超伝導コイルなどをこの中性子から守るためのシールドの役割も果たす。同時にリチウムに中性子を当ててトリチウムの生産も行う。固体材料を用いる方式と液体材料を用いる方式が考えられている。

ダイバータ

核融合反応を維持するために必要な高温高密度のプラズマは大きなエネルギーを持ちながら拡散していく。炉心から逃げ出していくプラズマが大きなエネルギーを持ったまま直接第 1 壁にあたれば壁は激しく損傷される。そのため、磁力線を工夫することによってプラズマの逃げ道を作ってそのエネルギーをうまく処理する場所が必要であり、この部分をダイバータと呼ぶ。ダイバータは核燃焼で生じる灰を除去するためにも必要であり、またプラズマと壁の接触で生じる不純物が炉心プラズマに侵入してプラズマ温度の低下を招くことを防ぐ役割も果たす。

球状トーラス

アスペクト比 (トーラスの半径とプラズマの平均半径の比) の極端に小さいトーラス配位で、球状トカマクとも呼ばれる。プラズマは芯を細くくりぬかれたリングのような形状をしているためこのような名前が付いた。イギリスの核融合研究の中心であったカラム研究所では、EC の共同による大型トカマク JET を誘致したため多くの研究者が JET 事業団に移り、トカマク研究は縮小された。そのような状況の中でカラム研究所に残ったグループが

新しい閉じ込め配位に挑戦し、START と呼ばれるトラス半径 32 cm という小型装置で平均ベータ値 40% という高ベータプラズマの閉じ込めに成功した。これを契機に、カラム研究所、および TFTR をシャットダウンした米国のプリンストン大学プラズマ物理研究所でプラズマ電流 1 MA 級の球状トラス実験が始まった。

レーザー核融合

大強度レーザーを使った慣性閉じ込め方式の核融合をめざすもので、日本では大阪大学に研究センターがある。大きさ 1 mm 以下で内部に核融合燃料を閉じ込めた球状ペレットに数十本以上の強力短パルスレーザー光を照射し、発生したプラズマの反作用で中心部の燃料を固体密度の 1000 倍程度に圧縮して核融合反応を起こす方式である。レーザーへのエネルギー変換効率と必要なレーザーパワーの大きさがネックとなっていたが、半導体レーザーの進展と大阪大学が開発した高速点火方式（ペレットの圧縮と中心部の核融合燃料の点火を分けて 2 段で加熱する方式）によって必要なレーザーエネルギーのしきい値が下がったことによって、磁場閉じ込め方式よりも低コストで自己点火条件の達成が視野に入ってきたと言われている。

IFMIF

材料開発のための中性子照射試験装置。液体リチウムターゲットに大強度定常重水素ビーム (40 MeV, 0.25 A) を照射して中性子を発生させ、500 cc 程度の容積内で試験材料に 20 dpa/年の中性子束を照射することを目標とする。1000 億円を越える費用が必要と見込まれ、ITER とほぼ平行して国際協力で進めようとしている。したがってこの装置を使った照射試験によって開発する材料は、ITER の次の実証炉の段階で採用するというシナリオになる。

研究会概要

日 時：2002年3月18日（月）午後1時～6時

場 所：蔵前工業会館（東京・港区）

講 師：

田島 輝彦（核融合科学研究所研究・企画情報センター）

笹尾 真実子（東北大学工学研究科）

参加者：※所属は研究会当時のものです

平田 光司（総研大教育研究交流センター）

井口 春和（総研大核融合科学専攻・核融合科学研究所）

永山 國昭（総研大生理科学専攻・岡崎国立共同研究機構）

高岩 義信（総研大素粒子原子核専攻・高エネルギー加速器研究機構）

浅川 直輝（東京大学理学系物理学修士2年）

室賀 健夫（核融合科学研究所神戸工学研究センター）

相良 明男（核融合科学研究所大型ヘリカル研究部）

小川 雄一（東京大学高温プラズマセンター）

福田 武司（日本原子力研究所那珂研究所）

吉岡 斉（九州大学大学院比較社会文化）

吉岡 正和（高エネルギー加速器研究機構）

西川 恭治（広島大学名誉教授）

江尻 晶（東京大学 新領域創成科学）

飯尾 俊二（東京工業大学 原子炉工学研究所）