

Requirements of compact pulsed nuclear fusion reactors for middle energy production.

中村 英滋, 佐藤 皓
NAKAMURA Eiji, SATO Hikaru

高エネルギー加速器研究機構
KEK

緒言

小型炉としての要件は、まず、出力要請により2通りに大別される。1つは既存の大型炉の最適化による高性能化であり理想追求の方向性である。学術的にも高度な位置付けとなり研究対象として最適である反面、研究達成は多くの困難が待ち受け、年月を要する。もう1つは出力量や効率等の性能を落としても早期に実現するものである。学術的には先進技術としての評価が低い、社会貢献への第一歩を踏み出すには適した方向性である。近年は社会貢献へ直結する技術開発も評価も低くはないため、先進的ではないにせよ、その方向性での議論も有益な取り組みとも成り得ると考える。若手研究者への魅力という観点では見劣りするかもしれないが、ここでは後者の観点で、基礎的な部分や大前提となる条件から顧みて議論してみたい。オーダーの評価や研究の方向性等理想論に近い話となり、次世代技術開発への期待も含めた議論になるが、各研究者の様々な研究の方向性を再認識して戴き高い目標を設定できるように柔軟な議論を戴きたく思っております。

基礎量

一例として磁気閉じ込め核融合炉を考える。核融合炉を考えるときの起点となる条件は、目標出力と核反応過程の選択になる。100万KW級の一極集中型発電を想定し、効率良く損失が少ないケースを求める場合、核反応時にエネルギーゲインが大きいDT反応を選択することになる。この選択において、核反応断面積が双方に重要な役割を担う。1つは単位時間あたりに核反応が起こる割合、つまり、発電電力量(P)に、もう1つは核反応を起こすために必要な高温の1次粒子エネルギーの生成のための一次電源の仕様を決めるものとなる。DT反応の場合、100 keV近辺に核反応断面積のピークがあり、電力換算では平均速度と

の積の評価になるため、50 keV近辺が効率のピークとなる($\eta, Q, V, n, \sigma v$ は、電力変換効率、1回の核反応時に与えられる粒子運動エネルギーの総量、核反応容積、核反応率)。

$$P \sim \eta Q V n^2 \langle \sigma v \rangle$$

これにより、目標とする粒子供給量やプラズマ容積、ひいては装置サイズが決定される。他方、核反応を起こすには、ミュオン触媒核融合等を除き、電離させて原子核の状態にしておくことが必要である。レーザー誘導等瞬間的な核反応以外では、クーロン力による斥力の影響が強いため、磁場等でほぼ同じ空間に留め置く必要がある。超伝導技術の発達により効率的に広い空間に磁場を展開できるようになったが、閉じ込めの基本は高エネルギー粒子のサイクロトロン運動が初歩となり、その回旋半径にも留意しなければならない。50 keVの粒子をITERクラスの5Tで閉じ込める場合はcmオーダーになり、弱磁場でやりたい場合には装置規模にも大きな影響を及ぼす。また、プラズマ温度は広いエネルギー分布を有していることにも留意しなければならない。小出力発電では問題ないが、1GW級で1%分そのような粒子が存在すれば10MWのロスということになり、真空容器内壁材の耐久性能にも影響することになる。

小規模化

前記の通り、一般の実用目的の装置開発においては、小出力化や各種パラメーターを下げることにより様々な問題を解決できることになる。しかしながら、核融合炉においては、いくつかの問題があり、小型化は逆に難しい課題ともみなされている。

1つは装置サイズのコンパクト化であるが、前記のように核融合出力を減じ容積を減らすことで基本的な対応は可能である。回旋半径の問題に関しても、強磁場技術を用いることで抑制が可能である。他方、核融合出力の熱

流束も軽減される。通常、実用炉を目的とした場合、炉壁等の材料耐久が問題となるが、小型化を進めていく場合、不可避である真空圧力への機械的耐久性が下限となると考えられる。昨年発表された Lockheed Martin 社のトラック積載可能な 100 MW 核融合炉計画はその解決策の一例であり、励磁コイルを真空環境内に極力近づけ炉壁を遠ざける設計となっており、プラズマコアと炉壁を 2 倍程度遠ざけることで熱流束負荷を半分程度まで低減させる形となっていると捉えてもよいかと察する。逆に、励磁コイル近辺の耐久性の強化は必要だが、そもそもの用途として、大型炉が 30 年程度の稼働を想定されるに対し、小出力炉は 5 ~ 10 年程度の想定とできれば実用に投入することも吝かではなくなる。

パルス化

もう 1 つの取り組みとして、時間的な効率化を計る方向性がある。近年、半導体素子等の進展に伴いデジタル制御が飛躍的に進展してきている。また、電力需要としても即時応答可能な要求も出つつあり、小回りの利く電源が有用な社会となりつつある。SMES 等の蓄電技術の組み合わせにより多様な供給が期待できる。100 T を越えるパルス強磁場技術の進展もあり、魅力的な方向性である。しかしながら、時間圧縮は、瞬間的な熱流束が数桁増大することを意味し、炉材料の耐久性問題が大きいのしかかる。単純な話として、1 秒に 1 ミリ秒出力では、その 1 ミリ秒間 1,000 倍の負荷に耐えなければならない。平均量では減じることとなるが、時間構造による耐久性問題が最大の課題となる。

指向性化

トーラス、スフェリカル等、円形・球形のデバイスに対して、ミラー型の線形装置での開発も進展している。これらの技術を用い、核融合反応の指向性出力の検討も行っている。指向性出力に対しては、前記パルス化で問題視したパルス圧縮に輪をかけて、立体角分、流束が桁違いに増えることになり、検討以前の話題とされる。しかしながら、小出力化と近年の高エネルギー粒子加速器の進展を見直すと、夢物語ではなくなっている。日本でも、装置規模が大きいにせよ、10 MW (1 万 KW) 粒子線出力を目指す IFMIF が建設中でもある。核融合出力を指向性化できれば、真空管電力増幅技術と同様な形で電気変換が可能となる。TriAlpha 社等が着目しているように非

中性子キャリアで 2 MeV 15 A クラスの出力が可能となれば実用に十分値する。高エネルギー粒子の運動エネルギーからの電気変換は、500 MeV 級電子のエネルギー回収型線形加速器でも効率的に行われている。勿論、回収効率は 100% とはいかないが、1 桁以下に落とすことは可能であり、熱負荷の軽減につながる。最終的には、非中性子キャリアでもビームダンプで熱負荷として受け止めねばならないが、ディフューザー等で指向性から拡散させて低減させることも可能である。

非磁場系核融合炉

最たるは慣性核融合、レーザー関係と感じる。コンパクト化に関しては、磁場閉じ込め系と同じ課題を有する。最後に残る課題は、よく知られているようにレーザー生成の電力効率改善、及び、電源のコンパクト化となる。

一時期、ミュオン触媒核融合 (μ CF) が候補に挙がり、様々な基礎実験が行われた。これが成されれば大型装置が不要となり一般普及が進むと期待したい。学術的 break-even として、ミュオンの触媒作用回数 300 回がめやすとなっており、最終実験結果は 150 回程度までできている。回数が伸びなかった主因は α のミュオン吸収現象である。 α によるミュオン不活性化に対する再活性化の検討もなされており、1,000 ~ 2,000 回程度の見通しがたてられてきた。他方、実用工学的 break-even へは、ミュオン生成効率の問題から未だ程遠い段階である。これに関しても高効率ミュオン生成装置の検討を継続して行っている。

常温核融合等他にも様々な手法が提言されているが、主発電には向かないまでも、1 次粒子生成のためのソース等部分的役割としては期待できる可能性がある。

結言

様々なハンドリングをいろいろな立ち位置から検討していきたい。核融合研究初期から様々な研究コミュニティで議論されてきているかと察しますが、ITER、原型炉、実用炉の実現と相補・相乗効果を産み出せるような検討の場を広く設けたく思っております。

謝辞

本講演に至るまでに長期的に、また、多くの方々のご協力を戴きました。学会事務局、及び、シンポジウム・年会開催関係者に厚く御礼申し上げます。この講演は、科研費 21540310, 25286089, 26610074 からの助成により得られた成果に基づくものとなります。