

コンパクト核融合炉の基礎研究とスペースプラズマへの応用

上原和也（日本原子力研究開発機構）、内田典弘・大野徳衛（ジャパンアドバンスシステムズ） 定本嘉郎（上越教育大学）、Voronin（ヨッフエ物理工学研究所）

1. コンパクト核融合炉とは

地上での核融合をめざした核融合装置はトーラスが主流であるが、大きくなりすぎるのが問題である、図1はトーラスの代表のトカマクの大きさを示したものである。一番左は原子力機構の

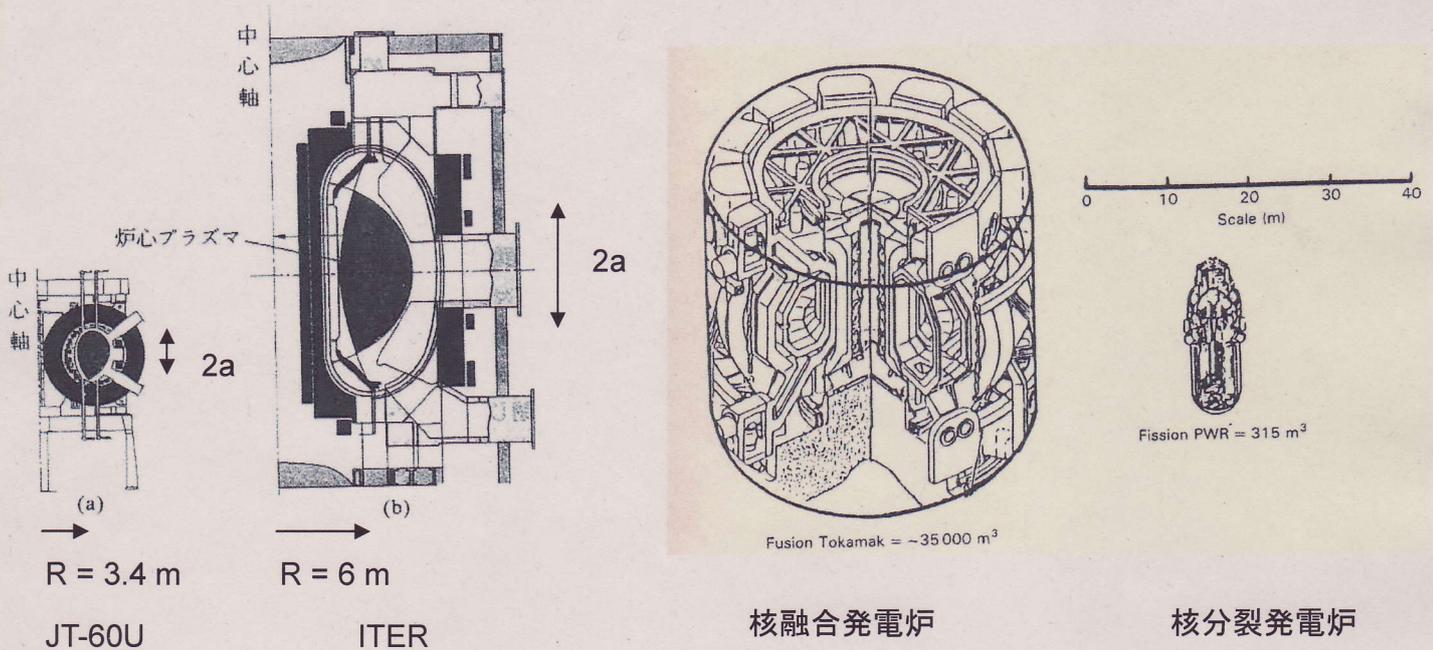
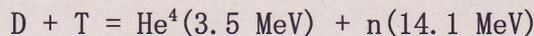


図 1 核融合・核分裂発電炉の大きさ

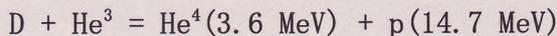
JT-60Uで、トーラス半径Rは3.4m、小半径aは1m、プラズマの体積Vは100m³である（JT-60UのプロトタイプであるJT-60は体積が60m³でJT-60の60という数字はここから来ている）。フランスのカダラッシュに建設予定のITERはこの図の左から2番目でRは6m、aは2m、Vは800m³である。これが核融合発電炉（図の左から3番目）になるとさらに大きくなり、この図ではVは35000m³となっている。これを現在の核分裂炉（一番右の図）と較べてみるとV=315m³と非常に大きなものである事がわかる。この核融合発電炉はアメリカのSTARFIREの設計をベースにしたもので、ここに書かれたスケール（このスケールは核融合発電炉に対しても共通である）から、核融合発電炉はR=12m、a=6mとなる。一方ここに示されている核分裂炉は、現在使用されている加圧水型原子炉（Pressurized Water Reactor, PWR）である¹⁾。核融合炉は次の重水素DとトリチウムTの反応を使うので、温度で2億度（20 keV）、密度で10²⁰ m⁻³以上のプラズマが必要である。



このD-T反応では、中性子のエネルギーが大きい為に、炉構造の放射化を齎し放射破損が核分裂炉の10倍も大きく、その遮蔽対策で非常に大きくなっている。

コンパクト核融合炉とは規模の縮小化を目指した閉じ込め装置で、閉じ込めに効果的なプラズ

マ電流（従ってポロイダル磁場）を生かしている。これには、Z ピンチ²⁾、FRC(Field Reverse Configuration 逆転磁配位)³⁾それにスフェロマック⁴⁾などがある。これらは次の D-He³ 反応：



で中性子は生じないが、温度で7億度（70 keV）, で $5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 以上のプラズマが必要である。中性子が出ない為に炉構造の放射化は核分裂炉と比べても 1/10 にしかならない。He⁴ や陽子 p は荷電粒子で、中性子と違って磁場で曲げられるので、直接エネルギー変換で発電を行う事も出来るし、イオンエンジンを含めた宇宙推進にも利用出来る。

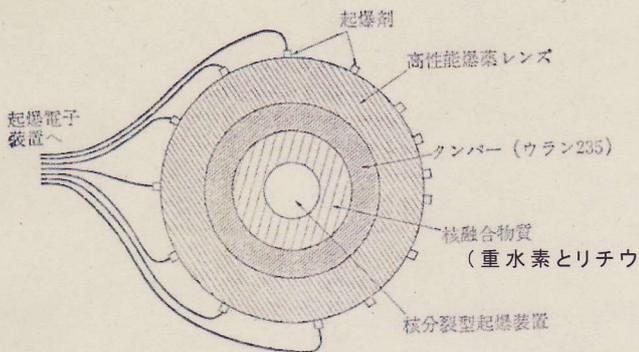
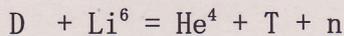


図 2 重水素爆弾の構造⁵⁾

小さい規模で核融合を起こしたものに水爆がある。これは水素爆弾と称しているが正確には重水素爆弾と称すべきものである。核分裂物質（ウラン235）に中性子を当てて分裂させそのエネルギー（熱）を追加熱として使って3億度（30 keV）の高温をだして重水素とリチウムによる核融合反応を爆発的に起こす。



その構造は図2に示すようなものである。ソ連の水爆は核融合物質と核分裂とが交互に巻かれた方式（レーヤーカーキ型）をとっている。この反応は T と n の発生で非常にダーティー（放射化）なものである。

2. イオンエンジンへの応用

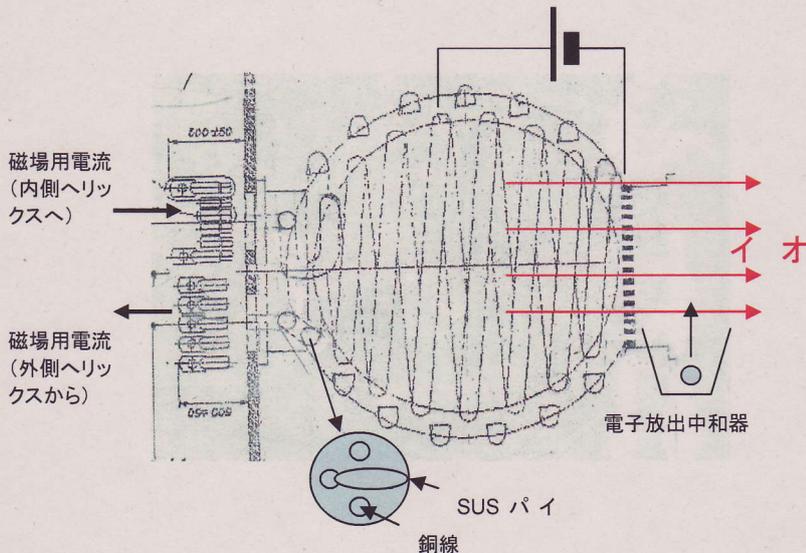


図 3 トルネードイオンエンジン

電気推進として利用されるイオンエンジンでのイオン源はソースプラズマの電子温度が大きいことと、プラズマの密度が高いことが要求されるが、従来の永久磁石によるカスプ磁場を用いたソースプラズマでは磁力線が開いているためにロスが大きく電子温度、密度ともに小さい。この部分に閉じた磁気面を有する球状の極小磁場を用いると電子温度、密度ともに大幅に改善されることが期待できる。トルネード磁場を用いたイオンエンジンの構造を設計してみた（図3）。磁場はカスプ磁場ではなく、中心が中空の極小磁場である。

これは3次元的に実現されていて、ヨッフエの極小磁場が立体的に実現されている構造である。ここに出来たプラズマは、行きどころがなく、永久にこの領域に閉じ込められる。イオン加速方

法は通常のイオンエンジンと同じである。極小磁場は本来的に球状で閉じているので、イオンを引き出す時は、磁力線を1部開いて、プラズマが漏れるようにする。トルネード領域へのプラズマの生成は、高周波(13.5MHz)のヘリコン波放電で行う⁶⁾。アンテナは、トルネードコイルを入れたステンレスのパイプである。その高周波入力方法を図4に示した。

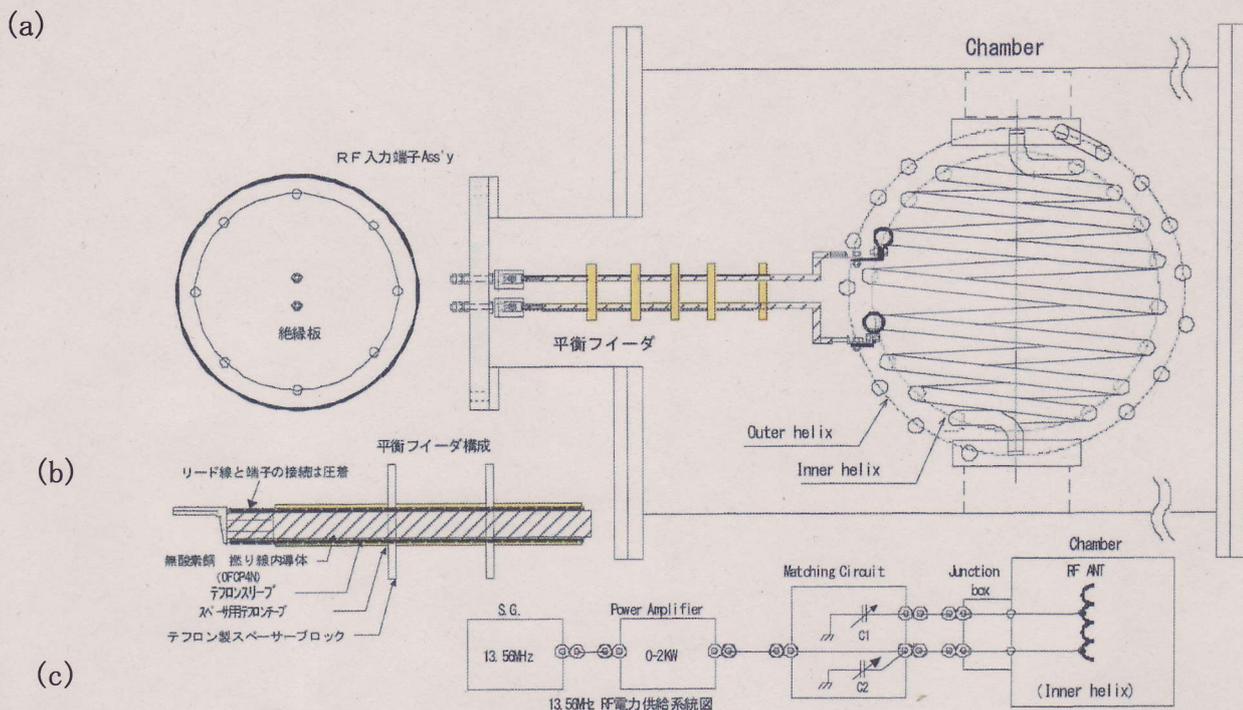


図 4 コイルをアンテナにしたRF給電方法

Tornado

Coil

は、プラズマを閉じ込める為の磁場電流を供給しているが、磁場電流の流れる導体(5本組)はSUSのパイプ(cable sheath)の中に入っており、このコイル状のパイプをアンテナにしてRFを印加する方法を考えた。図(a)はTornado CoilにRF電力を印加する為の入力端子から給電線(平衡形フィーダ)を用いてTornado Coilに接続するChamber内部全体の模式図である。RF入力端子からTornado Coil(sheath)までの給電線は、Rigid導体を使用する方が電氣的に安定していて理想的であるが、Chamberの構造上の作業性を考慮してflexible導体を使用する。Tornado CoilのInner helixへの接続方法は、sheathの機械的強度を考慮してClamp方式を採用する。

図(b)は給電線(平衡形フィーダ)の構造図である。導体材はChamber内部でSputter現象を防止する目的で、SUS又はAL、無酸素銅(OFCP4N)などを用いる。又導体の伝送特性(100~150Ω)を維持する為に適当な間隔に固定用のスペーサーブロック(テフロン製)を入れ平衡形給電フィーダを形成する。図(c)はTornado CoilにMatching Circuitを通して13.56MHz RF電力を印加する給電系統図である。構成は、13.56MHzの信号を発生するS.Gと1W~Max2KW(63dBm)のLinear Power Amplifier及び出力整合回路(VC1, VC2, C1, C2)からなっている。Tornado Coilに最大の電力が印加される出力整合状態は、Linear Power Amplifier出力部に設けられたCM電力計VSWRメータで整合状態をモニターする。

3. 宇宙時代へのエネルギー利用

東日本大震災の地震はマグニチュードMがM=9という大きさで、エネルギーE(J、ジュ

ール) は $E = 10^{18} \text{ J}$ という史上4番目のものであった ($E = 10^{(4.8+1.5M)}$ の関係がある)。これは広島原爆の10000倍に相当し、相当なものであった。地球上の地震で最大のものは1960年のチリ地震で $M = 9.5$ であった。これよりも大きな災害は、古生代に小惑星が地球に衝突して、地球が氷河期に陥り、恐竜が絶滅したといわれる事象が $M = 11$ であるとされている。これは上述の式から $E = 10^{21.3}$



図5 核融合宇宙推進器模式図

造的には図2の重水素爆弾の周りにコイルを巻いて磁場を作り、重水素爆弾の爆発的な反応をコントロールできるものになっている。内側ヘリックスは磁場を作るだけでなくプラズマの生成と加熱の為の高周波エネルギー導入のためのアンテナとしても使用する。D-He³核融合が極小磁場内で起こるとして、陽子のエネルギーとヘリウム4のエネルギーを少し開いた磁場で解放して推進に用いる⁸⁾。この図は、NASAがウランを用いた核分裂プラズマを利用してロケット推進に利用するという図を核融合 fusion に置き換えたものである⁹⁾。ここでは、核分裂の部分を実験に置き換えて、水素推進材を経ないで直接プラズマを噴射することを考えている。

参考文献

- 1) D. Pfirsch and K. Schmitter, Fusion Technology, 15 (1989) 1471
- 2) G. Yonas, 日経サイエンス、1998年 11月号
- 3) 郷田博司他、プラズマ核融合学会誌、84 (2008) 525
- 4) E. B. Hooper et al., Fusion Technology 29 (1996) 191
- 5) 河島信樹、「核兵器」地人書院、昭和60年、p. 30
- 6) 上原和也、スペース・プラズマ研究会、平成21年、p. 36
- 7) 関本博、原子力 eye, 57 (2011) 16
- 8) 長谷川晃、日本物理学会誌、47 (1992) 786
- 9) <http://ja.wikipedia.org/wiki/原子力推進> 及び最新宇宙飛行論、学研、1991年、p. 102