

原型炉設計における課題とその解決に向けて

電力中央研究所 & IFERC Demo Design Activity

岡野 邦彦

核融合炉設計の制約条件

過去には多くのトカマク型核融合炉の概念設計がなされてきたが、圧力上限の比例則、3 大トカマク稼働、ブートストラップ電流の確認、といった大きな研究展開によって、概念設計は 1980 年ころを境に大きく変化している。

プラズマ圧力上限は β_t 値と β_N 値としてよく知られている。 β_N が高いほど高い圧力が達成でき、出力密度が高い小型の核融合炉になる。定常炉の設計では、 β_N が高いほど Q 値 (=核融合出力/電流駆動パワー) が大きくできることも知られている。 β_N の上限値は電流分布や圧力分布の制御によって変わるが、それらを最適化した場合の理論上限値で言えば、安定化用の導体壁がプラズマのすぐそばにない場合に 3.5 程度まで、安定化導体壁がある場合は 5.5 以上である。

プラズマ密度の上限では、半経験的な上限としてグリーンワルドの密度限界 n_{GW} が知られている。これは絶対超えられない限界ではないが、超えると急速に閉じ込め性能が劣化するので、概念設計もこの値をひとつの目安とする。

ブートストラップ電流とは、プラズマ自身が特定方向に偏った粒子の流れを作りだし、自発電流として現れるものである。全電流に占めるブートストラップ電流(BSC 比)は、同じ β_t と q 値ならアスペクト比 A の 1.5 乗に比例して増加し、アスペクト比と q 値を決めれば β_t が高いほど大きくできる。

トカマク発電プラントの概念例

本講演で解説するのは、現在の知見でも設計制約上での大きな齟齬がない 1990 年以後の設計に限ることとした。

SSTR¹ (Steady State Tokamak Reactor) は、ブートストラップ電流を最大に利用する定常炉として最初の概念設計である。高めのアスペクト比 A=4.0 に設定した結果、BSC 比は 75% に達する。1990 年台になされた SSTR の設計は、今の知見で見てもバランスのとれた設計例であり、Steady State Tokamak Reactor 名の通り、定常炉概念の基準にふさわしいものである。

IDLT² (Inductive Day-Long-pulse Tokamak) は、本講演の中では唯一の誘導電流駆動の概念設計である (ITER を除く)。一言でいえば、誘導電流で運転するパルス・トカマクは大型にならざるを得ない。CS コイルの容量を大きくするために、中心部の空間を大きくとる必要があるか

らである。IDLT も R=10m と大型になった。一方、電磁誘導で十分な電流を流し、かつ大型化することで、プラズマパラメータはかなり緩和されている。たとえば、 β_N は 2.7 で、ここで紹介する 5 つの概念設計中では最小である。

CREST³ (Compact REversed Shear Tokamak) は、負磁気シアと MHD 安定化用近接導体壁の組合せにより β_N が理想的には 5.5 にも達しうることに利用した超高 β_N による高経済性核融合炉の概念である。高 β_N 平衡の維持のため、中性粒子ビーム入射による電流分布の制御とトロイダル回転の誘起に加え、ブランケット内に近接導体を設置し、抵抗性壁モード (RWM) の安定化を狙っている。

Demo-CREST⁴ は、実験炉 ITER と実用炉 CREST の間を 1 台の原型炉でつなぐことを目標に設計されたもので、大きな特徴は、設計パラメータの決定過程にある。従来の概念設計は、定格運転 (最大出力) を基準にして設計をしていたが、Demo-CREST では、運転初期ではその時点ですでに成功しているはずの ITER 標準運転のパラメータと同等のプラズマ性能とし、発電の確実な実証を狙った。その時の β_N は 1.9 と低い。発電実証後、プラズマ改善フェーズへと移行する。 β_N を 2.5 にできれば送電端出力は 23 万 kWe まで上昇する。負磁気シアで $\beta_N=4.0$ が実現し熱効率も 40% にできれば送電端出力は 109 万 kWe になる。

SlimCS⁵ は、R=5.5m、最大磁場 16.4T (中心磁場は 6T) で 2.95MW の核融合出力を達成する小型低アスペクト比の原型炉概念である。アスペクト比の 2.6 は JT-60SA で確認が可能な数値となる。設計上の大きな特徴は、最小化された CS コイルにある。SlimCS の CS コイルの半径は 0.7m と、ITER よりもずっと小さいが、 $\delta \sim 0.35$ の形状制御を可能とし、プラズマ電流 I_p をゼロから定格の 21% まで起動できる。SlimCS は単に低アスペクト比というだけでなく、工学設計においても様々な工夫があり、概念炉研究に大きな進展をもたらした設計例である。

- 1) M. Kikuchi, Nuclear Fusion **30** (1990)265.
- 2) Y.Ogawa, N.Inoue, Z. Yoshida and K. Okano, Fusion Technology, **24**(1993)pp.188-199
- 3) K. Okano, Y. Asaoka, T. Yoshida, M. Furuya, K. Tomabechei, Y. Ogawa, et al., Nuclear Fusion **40** (2000)635.
- 4) R. Hiwatari, K. Okano, Y. Asaoka, K. Shinya and Y. Ogawa et al., Nuclear Fusion **45**(2005) pp.96-109.
- 5) K. Tobita, S. Nishio, M. Sato, S. Sakurai, T. Hayashi et al., Nuclear Fusion **47** (2007) pp.829-899,.