

核融合炉設計から高温超伝導技術への期待 Expectations for High-temperature Superconducting Technology from Fusion Reactor Design

後藤 拓也
Takuya Goto

核融合研
NIFS

磁場閉じ込め方式の核融合炉においては、その経済性の観点から、できるだけ装置を小型化することが望まれる。このために、炉心プラズマの観点では、磁場に対するプラズマ圧力の比（ベータ値）をできるだけ高くすることが求められ、そのための物理研究が精力的に行われてきている。一方、トカマク型、ヘリカル型ともに炉心プラズマの性能はジャイロボーム則と呼ばれる経験則でおおまかに予測することができ、装置サイズ R と磁場強度 B の4/3乗の積 ($RB^{4/3}$) が一定であれば同等のプラズマ性能が得られる。これに対し、超伝導コイルシステムの製作の技術的難度やコストの指標となる蓄積磁気エネルギー E は装置サイズの3乗と磁場強度の2乗に比例するため ($E \propto R^3 B^2$)、同じプラズマ性能を維持する場合では、蓄積磁気エネルギーは装置サイズに相関することになり ($E \propto R^{1.5}$)、装置サイズを小さくし磁場強度を上げる方向のほうが有利となる。

しかし、磁場強度を増大させて装置サイズを小さくする設計はブランケットおよび超伝導コイルの設計の観点から厳しい。磁場閉じ込め方式において、超伝導コイルに流す必要のある電流値 I は装置サイズと磁場強度の積に比例する ($I \propto RB$)。一方、装置全体を相似縮小した場合、コイルの断面積は R^2 に反比例するため、超伝導コイルの電流密度 j は B/R に比例することになる。上述のプラズマ性能維持の場合、これは $j \propto R^{-1.75}$ を意味し、装置サイズを小さくした場合、超伝導コイルの電流密度を急激に大きくしないと相似形状を保つことができない。実際には電磁力支持のための構造材の存在や超伝導線材の臨界電流密度のために超伝導コイルの電流密度には上限があるため、超伝導コイルの断面積を大きくせざるを得ないが、そうすると超伝導コイルと炉心プラズマの間に位置するブランケットの設置スペースを制

限することになる。ブランケットの設置スペースが不足すると、超伝導コイルへの中性子束および超伝導コイル内での核発熱が過大となり、超伝導コイルの寿命と超伝導コイルの冷却に必要な冷凍機動力の観点から設計が成立しなくなってしまう。これは本質的に超伝導コイルと炉心プラズマが近接するヘリカル方式では特に顕著で、装置サイズの下限はプラズマ性能よりもこの制約によって決まる場合が多い。一方、トカマク方式では、プラズマ電流の立ち上げおよびプラズマ形状の制御のため、中心ソレノイドコイルと呼ばれる円筒状の超伝導コイルを装置中心に配置する必要があり、装置の最小サイズはこの中心ソレノイドコイルの半径に大きく依存する。

ここまでの議論で分かるように、もし超伝導コイルの電流密度を高めることができれば、磁場閉じ込め核融合炉の装置サイズを大きく低減できる可能性が出てくる。この点において、強磁場下でも高い電流密度が達成可能な高温超伝導線材は、核融合炉の設計を大きく変えるポテンシャルを有する。また、高温超伝導線材は液体ヘリウム温度よりも高い温度で運転が可能であることから、冷凍機効率の改善によるプラントのエネルギー効率の改善や、許容熱負荷の増大による設計裕度の拡大効果も期待できる。実際に、ヘリカル核融合炉を例に、電流密度25 A/mm²かつ冷凍機効率が0.3%（低温超伝導コイルの4 K運転を想定）の場合と、電流密度50 A/mm²かつ冷凍機効率が1.5%の場合（高温超伝導コイルの20 K運転を想定）の場合の違いを図1に示す。電流密度25 A/mm²、冷凍機効率0.3%の場合、ブランケット最小厚み Δ_{blk} を80 cm以上確保するためには磁場強度 B_c が3 T程度の低磁場設計でも装置主半径 $R_c = 14$ m以上、 $B_c = 6$ T程度にするには $R_c = 18$ m以上が必要になる。実際に低温超伝導コイルの採用を想定して設

計が行われたヘリカル核融合炉FFHR-d1では、ヘリカルコイルの核発熱 q_{nucl} を0.1 mW/cc以下に抑えることも含め、図に示した装置サイズ15.6 mが選択されている。仮に冷却手法が最適化され、より高い核発熱が除去できたとしても、そのために必要な冷凍機電力は過大となり、同じ核融合出力(P_{fus})であっても装置サイズを小さくするに従い正味電気出力($P_{\text{e,net}}$)は急激に低下する。装置サイズが大きな領域では正味電気出力の等高線が核融合出力の等高線と平行しているのに対し、装置主半径14 m付近より小さい領域でそこから大きくずれているのはこのためである。一方、電流密度が50 A/mm²、冷凍機効率1.5%の場合は、同じブランケット厚みを達成するのに必要な装置主半径を2 m程度減らすことができる。さらに冷凍機効率向上のため、冷凍機電力が問題になる領域は低装置サイズ側に大きくシフトする。仮に数mW/ccの熱負荷が許容できれば、12 mを切る装置サイズが見通せる。これは装置サイズの3乗にほぼ比例する物量で言えば半分程度の削減に当たり、建設コストの削減の観点からは大きな意味を持つ。蓄積磁気エネルギー W_{mag} も3分の2程度までに下げられ、コイル保護設計などの観点からも効果は大きい。このほか、高温超伝導コイルの導入は液体ヘリウムを用いないことによるヘリウム資源の節約や、導体接続による超伝導コイル建設期間の短縮、超伝導コイルの再分割による革新的な保守交換手法の採用など、磁場閉じ込め方式核融合炉の設計の柔軟性や魅力を大きく向上させる可能性を持つ。

講演ではここで示した例に加え、トカマク核融合炉の設計例も含め、電流密度の増大と冷凍機効率の改善が核融合炉の設計領域に与える影響を定量的に示し、高温超伝導技術への期待について述べる。

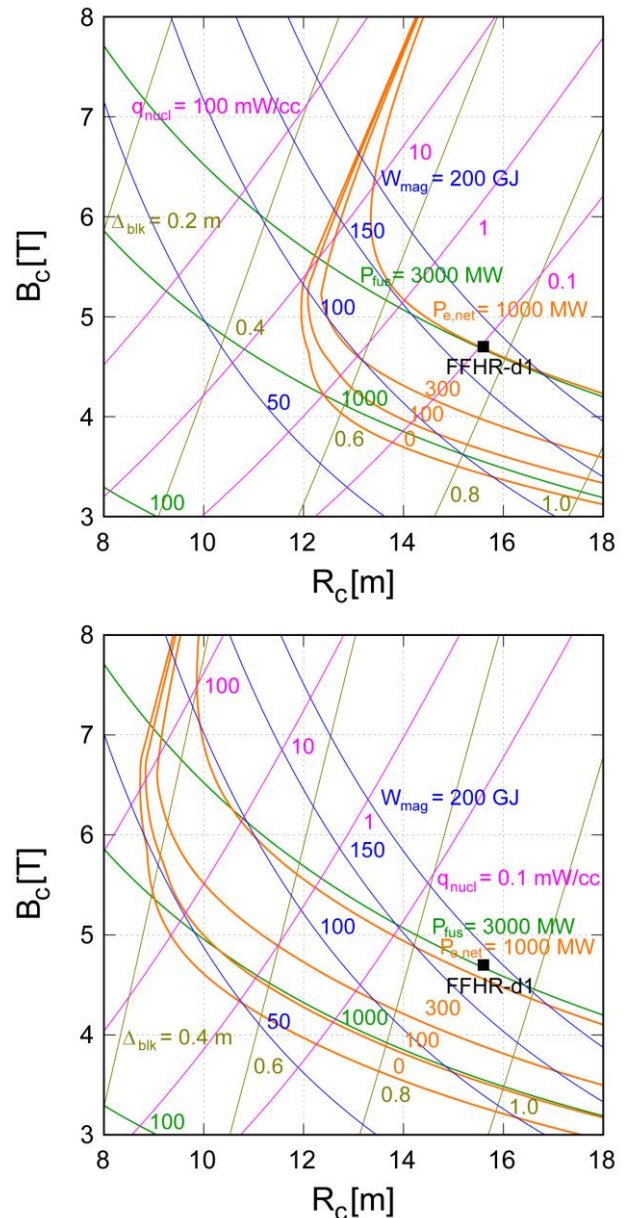


図 1 ヘリカル核融合炉の装置主半径 R_c 、磁場強度 B_c と核融合出力 P_{fus} 、正味電気出力 $P_{\text{e,net}}$ 、ブランケット厚み Δ_{blk} 、核発熱 q_{nucl} 、蓄積磁気エネルギー W_{mag} の関係。(上) コイルの電流密度 25 A/mm²、冷凍機効率 0.3% の場合、(下) コイルの電流密度 50 A/mm²、冷凍機効率 1.5% の場合。