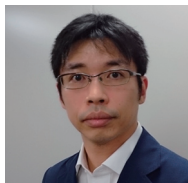


TODAY

着任のご挨拶



経済産業省
製造産業局 金属課
金属技術室長
大竹 真貴

本年（令和2年）7月20日に、経済産業省製造産業局金属課金属技術室長を拝命いたしました大竹真貴でございます。我が国の金属産業における国際競争力の強化、持続的な発展に向けて、技術という側面からサポートに全力を尽くす所存です。何卒よろしくお願いいたします。

本年春以来の新型コロナウイルス感染症の拡大を受け、金属業界においても、大幅な需要減に対応するため生産調整等を余儀なくされており、その影響は未だに続いております。経済産業省といたしましても、事業と雇用を守るための緊急対策に取り組んでいるところであり、一日も早い回復に向けて、引き続き尽力してまいります。

他方、新型コロナウイルス感染症の拡大以前より、我が国の経済社会においては、第4次産業革命、地球温暖化、人口減少、新興国の追い上げなど様々な課題が山積しております。今般のコロナ禍をこれらの構造的問題を解決するチャンスと捉え、長期的視点に立った日本経済の変革を後押し・加速していくべく、様々な施策に取り組んでまいります。

ご案内のとおり、金属を始める素材（マテリアル）は、自動車と並ぶ我が国の輸出産業の要（いずれも輸出総額の2割強）であり、我が国において大きな強みを有する技術領域の一つとなっております。こうした先進的な素材を活用した製品は社会課題の解決に大きく貢献することから、素材産業の革新力を高めることが、今後の日本経済・社会の強靱化のためには不可欠となります。このような問題意識の下、経済産業省と文部科学省におい

て、本年6月、『マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて（戦略準備会合取りまとめ）』を策定・公表しました。本取りまとめにおいては、例えば、データを基軸としたマテリアル研究開発の重要性などを謳っております。経済産業省においても、令和3年度の予算概算要求に、AIやMIを活用した革新的合金探索手法の開発のための予算を新規で計上させて頂いたところですので、今後、検討の舞台を内閣府に移し、マテリアル革新力強化のための政府戦略策定に向けた検討を進めてまいります。

また、近年の台風を始めとする異常気象の多発に伴い、地球温暖化問題への関心が世界的に高まっております。我が国では、2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度比で26%削減するという目標を掲げております。加えて、長期的には、「脱炭素社会」を今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指すとともに、2050年までに温室効果ガスの80%削減に大胆に取り組むこととしています。このチャレンジングな目標を達成するためには、従前の取組とは非連続なイノベーションを、ビジネス主導で実現していく必要があります。金属技術室では、民間企業や関係機関が主体となった、水素還元等プロセス技術開発（COURSE50）、フェロコークス技術開発、輸送機器の抜本的な軽量化に資する技術開発などの各取組を支援しております。我が国の金属業界が、地球温暖化問題の解決に向けても世界をリードし、「環境と成長の好循環」を実現できるよう、取り組んでまいります。

繰り返しになりますが、金属分野の技術開発は、我が国の国際競争力強化のみならず、社会問題の解決にも重要な役割を担うと考えております。今後、多くの現場を訪問し、広く深く意見交換していくなかで、課題やボトルネックを見極め、その解決に向けて、皆様と一緒に全力で取り組んで参りたいと考えております。何卒、ご指導・ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

夢の核融合エネルギーがいよいよ現実に

—金属材料が切り拓く人類の未来—

量子科学技術研究開発機構

核融合エネルギー部門長 栗原 研一

1. はじめに

究極の基幹電源を目指して、半世紀以上世界中で研究開発が進められてきた核融合エネルギーは、今大きな進展が期待される状況を迎えている。世界の7つの国と地域(日欧米露中韓印)による国際協力で、核融合実験炉 ITER(イーター)が、南フランスで建設が進んでいる。装置の機器製作や関連建家の建設は、現在完成度約70%を超え、2025年に運転開始予定である。このプロジェクトの特徴は、構成する機器を参加国が分担製作し、物納して現地で組み立てるという点にあり、技術的にも運営的にも困難度は人類史上最大級の国際協力と考えられる。日本は、ハイテク機器を分担しており、ITER最大の構成機器である超電導トロイダル磁場コイルは、今年最初の2機が建設サイトに到着して、いよいよ装置本体の現地組立が開始される。

さらに日本国内においても装置建設が進展している。サイズでITERの半分の大きさの超電導トカマク型核融合装置 JT-60SA は、量子科学技術研究開発機構(以下量研)那珂核融合研究所にて日欧協力で建設が進み、ITERに先駆け2020年3月に装置組立が完了、今年中のプラズマ運転開始を目指しコミショニングを進めている。その先進的な設計はITERを支援・補完する装置として世界から注目され、同時に研究人材の育成も目的の一つである。

これら核融合装置は、強力な磁場により大電流のプラズマを閉じ込めるため、大きな電磁力に耐える必要がある。ITER及びJT-60SAは、本体部分だけでそれぞれ総重量23000t、2600tであり、その殆どは-269℃(4K)の極低温状態でも十分な靱性を示すステンレス鋼の一種を中心とする金属構造物である。核融合反応で発生した中性子が、構造物のステンレスを放射化させ、生成されたコバルト60(Co60)から出る強いガンマ線により、実験直後は人間が近づけず、装置の維持管理のために耐放射線ロボットが必須となっている。このガンマ線量を低減させる目的で、ステンレス中の不純物であるコバルト(Co59)の含有量が少ない低コバルトステンレスを使用する。

実験炉ITERの次のステップである原型炉で核融合発電を実証することが、当面の目標である。日本のロードマップでは、ITERで本格的な核融合燃焼の長時間維持が実現する2035年頃に、原型炉建設に移行するかどうか判断される。JT-60SA、ITER、原型炉へと繋

がる核融合エネルギー実現への最短ルートは、トカマクと呼ばれる磁場閉じ込め方式である。トカマクとは、発明したロシアで命名された装置の型式で、電流・容器・磁気・コイルという意味のロシア語の最初の1音を繋げた造語である。

本稿では、近く大きな進展が予想され、核融合発電へと近づく研究開発を金属材料という視点から概観する。

2. 核融合エネルギー生成の原理と開発小史

発電で利用する核融合反応は、図1に示すように重水素(D)と三重水素(T)が結合して、ヘリウムHeと高速中性子が発生する反応である。核融合反応のエネルギーは中性子の速度として外に取り出され、プラズマを取り囲むように配置したブランケットと呼ばれる装置で熱に換え、タービン発電機を動作させる。このブランケット中には、中性子増倍材としてベリリウム(Be)、リチウム(Li)を入れておく。中性子とLiとの反応により、燃料の三重水素を生産させる。1個の発生中性子で1個以上の三重水素を生成すると同時に、Liとの発熱反応はプラズマからの核融合出力をさらに約20%増加させる。

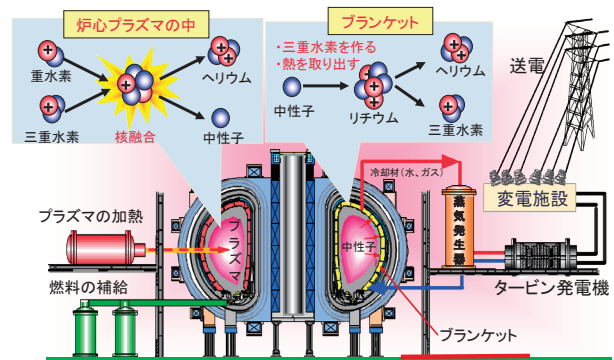


図1 核融合エネルギー生成の原理と発電所概念

このような核融合反応を効率良く実行出来るトカマク装置の基本構成機器と磁力線構造を図2に示す。効率の良さは、装置規模の増大と正の相関があり、発電炉では、実験炉ITERのサイズ以上の規模が必要であることが判っている。構造上、強磁場中に大電流を流すコイルが置かれるため応力に耐える金属構造物により支持されなければならない。超高真空中でプラズマを生成することから、金属製ドーナツ型容器が必要である。超電導コイルを収納する金属構造物は、-269℃という極低温でも強度を維持することが要請される。また、核融合反応中性子による金属構造物の放射化は、

極力低く抑えることが要請される。さらに、放射性廃棄物量を著しく少なくするため、一旦放射化しても早く放射線を発生しない一般物に戻る「低放射化」金属材料であることが発電炉以降望される。

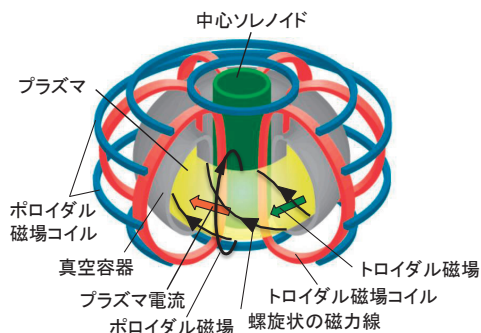


図2 トカマクの構成機器と磁力線構造

ドーナツ容器を取り囲むように配置されたトロイダル磁場コイルにより強力な円環状の磁場を作る。容器内のプラズマ断面位置形状を制御するため、ドーナツ容器に沿って、同心円状にポロイダル磁場コイルを配置する。プラズマ中に周回電流を励起制御する中心ソレノイドをドーナツの穴を貫くように配置する。プラズマ中の周回電流であるプラズマ電流とトロイダル磁場コイルの合成磁場は、螺旋状の磁力線を構成する。プラズマ中には、螺旋の振れのピッチが同一の磁力線により一つの円環状の面(磁気面)が形成され、それが幾重にも入れ子になった多層構造を持ち、磁力線に巻き付いたプラズマ粒子を閉じ込める。この多層磁気面構造を維持しながらプラズマが高速に周回する点が、高いエネルギー閉じ込め性能を有するトカマク装置の最大の特徴の一つである。

日本の核融合研究は、日本人初ノーベル賞受賞の湯川秀樹博士が1957年に創設した原子力委員会核融合反応懇談会を起源とすることが出来る^[1]。その後、日米欧露を中心に核融合研究開発競争が展開され、1990年代は大型トカマク装置によるプラズマ性能競争が繰り広げられた。その中でも、日本が発明したダイバータと呼ばれるプラズマを容器壁から浮かせる機構を装備している欧州の装置 JET と日本の臨界プラズマ試験装置 JT-60 が、1990年代後半に臨界プラズマ条件を達成した。エネルギー増倍率 $Q=1.25$ の世界記録は、JT-60 が1998年に達成し、イオン温度 =5.2 億度、電子温度 =3 億度と共に今なお日本の装置 JT-60 が世界最高記録を保持している^[2]。

21世紀に入り、日米欧露による実験炉 ITER の工学設計を経て、7国(極)による建設が開始された^[3]。実燃料(=重水素 D と三重水素 T)を燃焼させ、核融合出力 50 万 kW、 $Q>10$ を約 400 秒継続することが重要なミッションとされた。一方、早期原型炉実現のために ITER だけでは十分でない高圧力プラズマ定常実験や原型炉製作に必要な技術情報等を日欧共同事業「核融合エネルギー研究分野における幅広いアプローチ(BA: Broader Approach)活動」^[4]の中で、それぞれ JT-60SA、原型炉に向けた必要な工学設計・R&D 活動により取得することとした。これにより日本は原型炉実現に必要な技術を手中に収められるという戦略としている。

実験炉 ITER、JT-60SA 等の BA 活動と並行して、原型炉設計・建設を可能にするシナリオが必要である。そこで、産官学の核融合専門家により、2013年以降段階を踏んで検討が実施された。その結果、2017年「核融合原型炉研究開発の推進に向けて(新推進方策)」、2016

年「原型炉開発に向けたアクションプラン」、2018年「原型炉研究開発ロードマップ」がとりまとめられた^[5]。

現在、このシナリオに沿って、原型炉研究開発を実施中である。JT-60SA、ITER、日本の原型炉^[6]の規模・サイズを図3に示す。原型炉建設に移行するかどうかを判断する時期は、ITERにおけるDT実験が開始する2035年頃とされている。もし、その時点で建設に移行されれば、建設期間として約10年程度を経て、最速で2040年代後半に核融合発電による電力供給を実現することとなる。

装置	JT-60SA	ITER	原型炉
プラズマ電流	5.5 MA	15.0 MA	12.3 MA
トロイダル磁場	2.25 T	5.3 T	5.94 T
核融合出力	Q_{DT} 換算=1	0.5 GW ($Q_{DT}=10$)	1.46 GW ($Q_{DT}=17$)
主半径 R_p	3.0 m	6.2 m	8.5 m
小半径 a	1.1 m	2.0 m	2.4 m
非円形度 b/a	1.87	1.7	1.65

図3 JT-60SA、ITER、原型炉の規模・サイズ

3. 金属材料の視点から見た実験炉 ITER

これまでの研究開発で日本が世界を相手にした性能競争でリードして来た最大の理由は、国内産官学の連携協力体制である。トカマク型プラズマ核融合装置は、人工物開発史上最大規模の金属材料を用いた電気装置である。装置規模が大きいため、大量の金属材料を必要とし、また磁場発生用コイルには、大電流を制御して流すことが必須である。

金属材料に課せられた要求は以下である：

- ①極低温で高い強度を保有する金属
- ②超電導導体
- ③高い応力に耐える金属
- ④耐熱性能の高い金属
- ⑤中性子による放射化が起きにくい金属・減衰が速い金属

ITERを構成する主要コンポーネントについて、金属材料への要求内容、材質、重量等を述べていく。図4に、ITERの構成機器と重量を示す。本体総重量23000tに対して、合計22500tを占める。残る500tは、配管や熱遮蔽材等の重量合計である。総重量の比較では、エッフェル塔7300tのほぼ3倍と言われている。殆どの材質はステンレスであり、放射化を低く抑える低コバルト仕様のステンレスである。

史上最大の超電導コイルであるトロイダル磁場コイル(TFC)は、トカマク装置の基本となるプラズマ閉じ込め磁場を生成するニオブスズ(Nb_3Sn)合金を超電導導体とするコイルである。超電導導体は、ステンレス製の被覆管に通し、絶縁処理した後溝を掘ったステンレス製溝板にはめ込みD型に巻く。これを7層積層して含浸し、その全体をステンレス製の構造材で覆う。全18個、日本と欧州が半数ずつ製作する長径約17m x 短径

9m(許容精度数 mm 以下)の巨大なハイテク機器である。コイル 1 個のステンレスは、素材重量約 440t で製品重量 260t、減った 180t の内、140t は溝板切削加工で発生する。超電導導体を含めた TFC の総重量は約 300t x 18 個 = 5400t である。

厳しい応力に晒されるステンレス構造材の材質は、SUS316LN 材 (LN: 低炭素・窒素添加) をベースとして、強度・靱性を向上させた強化オーステナイト鋼である。

ポロイダル磁場コイル (PFC) は、プラズマ位置形状を制御するニオブチタン (NbTi) 合金を超電導導体とするコイルである。図 4 に示すようにドーナツと同心円で主半径 4m/8m/12m のコイルが上下で計 6 種類の PFC が設置され、総重量は約 1500t である。

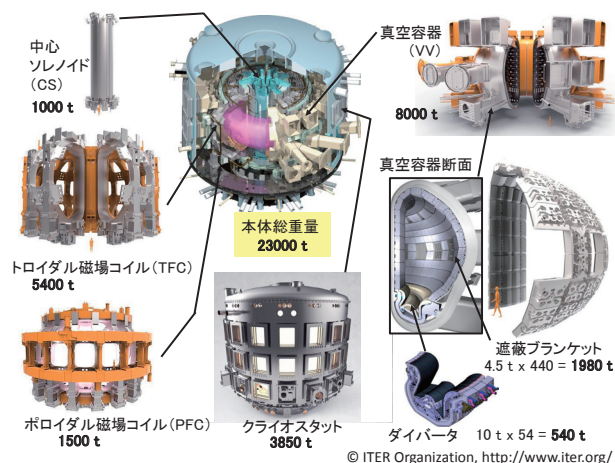


図 4 ITER を構成する主要機器とその重量

中心ソレノイド (CS) は、プラズマ電流を制御するニオブスズ (Nb₃Sn) 合金を超電導導体とするコイルである。直径約 4m、全高 18m で、独立に電流を制御出来る 6 種類のコイルからなる。総重量は、約 1000t である。

真空容器 (VV) は、プラズマを格納する容器で、高真空保持、電磁力の支持、放射性物質の閉じ込め等を行う二重壁構造の重要機器である。図 4 に示す断面の内壁・外壁共に 60mm の厚さで、材質 SUS316LN ステンレス材で完全溶け込み溶接により製作することが仕様である。総重量は約 8000t、その内ポート部だけで 3000t である。

遮蔽ブランケットは、核融合プラズマから発生する中性子を遮蔽する機能の機器で、ベリリウム (Be) を銅とステンレスに接合して構成する。1.0m x 1.5m 角のモジュールを 440 個、真空容器の内側に取付けられる。総重量 4.5t x 440=1980t。ダイバータは、図 3 のプラズマ断面のようにプラズマを壁から浮かせて保持する際、磁力線に沿って高速粒子を導く部分で、定常熱負荷 10MW/m²、

過渡的短時間熱負荷 20MW/m² に耐えることが求められる。タングステン (W) 製モノブロックを表面保護タイルとして、SUS316LN ステンレスの支持構造体で構成される。ブランケット、ダイバータ共に強制冷却を行う。

クライオスタットは、本体全体を真空断熱する容器である。内容積 16000m³、10⁻⁴ Pa の真空度を維持する容積は 8500m³、ステンレス製、総重量 3850t である。

4. まとめ — 発電する原型炉の金属材料 —

冒頭に述べたように、核融合研究開発は、新たな大きな展開期へとさしかかって来ている。近く運転を開始する JT-60SA は、原型炉に必要とされる高圧力プラズマにおける不安定性抑制を、高度なプラズマ制御により実証する^[7]。金属材料が機能的に組み合わせられた実験炉 ITER は 2025 年から運転を開始し、2035 年から DT 核融合反応が持続的に地上で起こせることを確認する。この後、早ければ原型炉の建設に移行し、本格的な核融合発電を今世紀半ばに実現することを目指す。

実験炉 ITER における金属材料の物量を基に、原型炉での物量を粗く見積もってみる。単純に主半径の比較として、ITER が 6.2m、原型炉 JA-DEMO^[6] が 8.5m である。体積比較を 3 乗とすれば、(8.5/6.2)³=2.58 倍となることから、原型炉における金属総重量は、23000t x 2.58 = 約 59000t と見積もられる。

特に原型炉構造材料では、ステンレスよりも放射化しにくい金属材料として、低放射化フェライト鋼 F82H が一つの有力候補として検討されている^[2]。このように金属材料が、核融合発電炉の基本要素であるだけでなく、早期実現に向けた最重要要素であることを強調したい。

参考文献

- (1) 山本賢三、「核融合の 40 年」ERC 出版 (1997 年)
- (2) 関昌弘編、「核融合炉工学概論」, 日刊工業新聞社 (2001 年)
- (3) ITER 情報 : <https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/index.html>
ITER 機構 : <https://www.iter.org>
- (4) 幅広いアプローチ活動情報 : <https://www.qst.go.jp/site/ba>
- (5) 原型炉開発戦略は、以下の文献 (掲載学会の HP で情報入手可能) :
① 坂本修一、山田弘司、「今後の核融合原型炉開発に向けて」プラズマ・核融合学会誌、90 (2014) 821-824.
② 松浦重和、小川雄一、岡野邦彦、上田良夫、秋山毅志、「核融合原型炉開発に向けた新推進方策・ロードマップ作成にあたり」プラズマ・核融合学会誌、94 (2019) 575-582.
③ 岡野邦彦、飛田健次、「核融合原型炉開発の動向 アクションプランと核融合炉工学研究の進展」日本原子力学会誌、60 (2018) 637-641.
- (6) K. Tobita, et al, "Overview of the DEMO conceptual design activity in Japan", Fusion Engineering & Design, 136 (2018) 1024-1031.
- (7) 栗原研一、鎌田裕、坂本宜照、鈴木隆博、出射浩、「小特集：燃焼・高ベータプラズマの実現に向けたプラズマ分布制御の課題」プラズマ・核融合学会誌、86 (2010) 517-542.

著者紹介



栗原研一 (くりはら・けんいち)
量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門長。
JT-60 の設計段階からプラズマの実時間制御システムの研究開発に従事。特に実践的アプローチを志向。現在は、ITER 等の建設プロジェクトを加速し早期の核融合エネルギー実現を目指す。

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 408 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2020 年 10 月 1 日
発行人 小紫 正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目 5 番 11 号 第 11 東洋海事ビル 6 階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp