

1. ITERだより 第100回という節目を迎えて

今回, ITERだよりは第100回という節目を迎えることができた. ITERだより第1回は2007年1月に発行され, その後の16年半という年月の間に, 数多くのマイルストーン (ITER建設サイトの整備, ITER調達機器の完成, ITER組立開始, ITER機構職員の増加など) が達成され, その進展は目覚ましい. 他方, これはまだ道半ばであることに, 心が引き締まる思いもある.

これまでのITERだよりを振り返ると, まず第1回で「ITER共同実施協定締結」と題して, 2006年11月21日, ITER参加各極の閣僚級による会合がパリ・エリゼ宮で開催され, ITER計画の実施主体となるITER国際核融合エネルギー機構 (ITER機構) が設立された事を報告している. その後, 2007年1月からITER建設サイトにおいて樹木の伐採作業が始まった (「ITER建設サイトの整備作業が開始」(第2回)). 当時のサイトは小高い丘陵地帯の森であった. その後サイトは, 2007年10月に180haの平地となった.

日本国内機関として, 日本が調達責任を有する機器の完成についても適宜報告している. 2016年より製作に着手した日本の調達機器であるITERジャイロトロン実機2機が世界で初めて完成したことを第62回「ITER用ジャイロトロン1, 2号機の製作完了」にて報告. また, 世界最大のニオブ・スズ超伝導コイルであるITERトロイダル磁場コイルを世界に先駆けて完成 (2019年1月) し, その記念式典を開催したことを報告した.

平地となったITER建設サイトでは, 建築が進み, トカマクピットや組立建屋など主要建屋が完成 (図1). そこに各加盟国で完成した機器の搬入がはじまり, それを祝う組み立て開始式典の開催 (2020年7月28日) を報告した (第83回). 各加盟国が分担する調達機器が完成し, ITER建設サイトに続々と集結し, ITER本体の組立準備が整ったことを, コロナ禍の困難があっても加盟国首脳オンラインで集い, その門出を祝った.

残念ながら, 2022年にITER計画はビゴ機構長という偉大なリーダーを失った. 新たなリーダーのもと, その意志を引き継いで, 今ある技術的困難に立ち向かいながら, 建設を推進している. 是非, 引き続き, ITER計画へ

のご理解とご支援を賜りますようお願いする次第です.

2. 負イオン学術専門書 Physics and Applications of Hydrogen Negative Ion Sources の刊行 (ITERプロジェクト部部长 井上多加志)

1970年代に仏エコールポリテクニクのバカール教授らは, 水素のアーク放電プラズマ中に水素の負イオンが予想を超えて高密度で存在することを見出した. 水素負イオンはプラズマ中であっても容易には生成されないというのが通説だったのだが….

筆者が核融合研究を目指して日本原子力研究所 (原研) に就職した1986年当時, プラズマ加熱装置である中性粒子入射装置 (NBI) の一次ビームには水素 (または重水素) の正イオンビームが用いられていた. 三大トカマク (TFTR, JET, JT-60) の次の段階である実験炉では, より大きなプラズマの中心部までビームを入射して加熱するためにMeV級の高いビームエネルギーが必要とされるが, 200 keV以上のエネルギーでは正イオンの中性化効率はほぼゼロになってしまうため, NBIは核融合炉では使えないと言われていた.

しかしながら負イオンであれば, MeV級の高エネルギーであっても, 簡単な構造のガスセルで, しかもわずかなガス圧で約60%の中性化効率が得られる. 原研では体積生成負イオンをNBIに利用する研究開発にいち早く着手し, 1985年に100 mA, 1986年には1 Aと着実に負イオンの大電流化開発を進めたのである.

1987年, 原研はバカール教授を日本に3か月間招聘した. 大型のイオン源試験装置で大電流負イオンを自分の手で実験したい, それがバカール教授の望みだった. この時, バカール教授のサポート役に抜擢されたのが当時修士卒2年目の筆者だった.

こんな出会いがあり, 会えば負イオンの議論を続けてきた. 本書はバカール教授を取巻く負イオンコミュニティの40年にわたる研究成果をまとめた学術専門書である. その内容は多岐に渡り, 負イオン体積・表面生成の物理, 生成・輸送過程のモデリング, 低電子温度・高密度負イオンプラズマ, 負イオン引出しの物理, 中性化プロセスと中性化セル, ヘリコン放電負イオン源, RF駆動・ECR



図1 左: 2007年3月30日 木の伐採が始まったITER建設サイト.
右: 2023年3月17日 建設が進むITER建設サイト (建設進捗率 78.1% 2023年2月末時点).



図2 2023年5月に発行された負イオン学術専門書 Physics and Applications of Hydrogen Negative Ion Sourcesと筆者。

駆動負イオン源、核破砕中性子源用負イオン源、そして JT-60U・ITER NBI 用負イオン源と加速器と、当初全く謎に包まれていた負イオンの物理機構を一枚一枚ペールをはがすように明らかにし、手探りの中から加速器や NBI といった応用分野に活用していった現時点での集大成といえる、世界初の負イオン専門書である。

日本は LHD と JT-60U/SA に負イオン NBI を持つ世界をリードする負イオン先進国である。それゆえ、和田元先生（同志社大）、笹尾真実子先生（同）、宮本賢治先生（鳴門教育大）、堀池寛先生（阪大名誉）等、多くの国内の先生方を著者に迎えている。筆者は、原研、原子力機構、量子科学技術研究開発機構（以下、量研）と組織名は替わっても脈々と続けられてきた負イオン研究開発の成果と、JT-60U 負イオン NBI、ITER NBI の負イオン源と加速器への応用を取りまとめた。また ITER 負イオン源に採用された RF 駆動負イオン源については、IPP ガルヒンクの U. Fantz 教授がその開発の基礎を本書に詳述しており、まさに ITER NBI の学術的な基盤を与える専門書となっている。本書（図 2）の刊行祝いに、バカール教授とパリでの再会を計画しているが、若かりし頃の師弟関係のまま、思い出話とともに負イオンをめぐる議論を再開するのが待ち遠しい。

3. ITER 機構 技術調整会合が初開催

ITER 機構 (IO) の主催の下、技術調整会合 (TCM) が IO 本部において対面及びリモート参加のハイブリッド形式で開催された。IO 及び参加 7 極から約 300 人の参加 (リモート参加含む) を得て、2023 年 4 月 11 日～14 日の 4 日間にわたり、IO のベクレ工学部門長を議長として調達・建設の進捗、システム横断的課題、新ベースライン策定に関する課題が議論された。会合では冒頭のバラバスキ機構長による所信表明の後、2023 年 3 月に着任した鎌田新副機構長から、ITER は One Step to DEMO として DEMO 炉に必要な技術の習得を目標とすべきことが強調された。今回の会合で特に議論が白熱した議題の一つは、新ベースライン検討の一環として第一壁アーマ材として従来採用してきたベリリウム (Be) をタングステン (W) に

変更する案である。Be は低原子番号材でありプラズマの放射冷却効率が低いことから、欧州の JET で採用されて高いプラズマ性能の実現に貢献してきた。一方、Be はその強い毒性により取扱いには放射性同位元素に準ずる厳格な規制が適用され、遠隔保守機器やホットセル施設等に特段の高い要求が課せられている。IO 側から工学的な視点から Be と W の比較が示され、安全性、許認可手続き、組立て作業、廃棄物処理及び遠隔保守に大きな利点があると共に、各国で設計を進めている DEMO 炉では Be 使用が想定されていないこと、W 使用による放射冷却の増大を加熱システムの増力及び第一壁表面のボロン (B) コーティングで補えることが示された。このほか、安全工学、計装制御、超伝導コイルの核発熱の増大等に関する議論があった。また、既存装置からの教訓を紹介するとして HL-2M, JT-60SA, KSTAR, WEST からそれぞれ講演があった。なお TCM は今後、年 2 回の頻度で開催し、技術課題や懸案事項等に関する議論を行う見通しとなっている。

4. 最終受入試験を迎えた ITER ダイバータ垂直ターゲット (OVT) プロトタイプ

量研は、日本が調達責任を有する ITER 向けのダイバータ外側垂直ターゲット (以下、OVT) の実規模大プロトタイプ及び実機の製作を進めている。これらプロトタイプや実機の製作では、ITER 仕様を満たす主要材料 (タングステン・ブロックや銅合金冷却管、特殊ステンレス鋼鍛造材など) を量研が予め調達し、ダイバータ製作メーカーへ支給し製作する。この度、三菱重工業 (株) とともに 2020 年 6 月に開始した実規模大プロトタイプの製作が完了し、量研・那珂研究所が実施する最終受入試験のために納入された (図 3, 図 4)。

本プロトタイプは実機製作に必要な技術、例えば受熱部であるプラズマ対向ユニット (以下、PFU) 1 流路当たり約 140 個のタングステン・モノブロックと銅合金冷却管の接合や、この PFU11 本を設置する特殊ステンレス鋼製支持構造体などの溶接及びこれらの非破壊検査に関する認証試験を実施するなどして、段階を踏んで実証された技術により製作されている。三菱重工業 (株) の高い



図3 搬入されたITERダイバータ外側垂直ターゲット・プロトタイプ。



図4 高温リーク試験装置の真空容器内への設置準備をしているITERダイバータ外側垂直ターゲット・プロトタイプ。

技術力と一貫した品質管理体制により製作されたプロトタイプは三次元寸法計測により表面輪郭度や幾何形状に関する厳しい要求公差を達成している。プロトタイプで得た経験や知見を生かし、現在、実機製作の製作工程を確立して、実機製作も進めている。

搬入されたプロトタイプに対して、量研が製作した試験装置を用いて高温リーク（漏れ）試験を実施する。本試験は、実機OVT全数に対しても実施するものであり、真空容器内に設置したOVTを運転温度まで昇温し、その流路にヘリウムガスによりITER運転時の冷却水と同じ圧力を繰り返し与え、真空中へのリークが無い事を確認するものである。本試験完了後、再度寸法計測等を行い、ITER建設サイトへ輸送する。輸送後は、ITER機構により他極が準備した他のプロトタイプ（カセットボ

ディ、内側垂直ターゲット、ドーム）を用いたダイバータカセットの組立試験を実施する計画である。

5. ITER 機構邦人職員等の応募支援、セミナーの開催

2023年5月末現在のITER機構職員は1089名であり、そのうち邦人職員は専門職39名、支援職3名の合計42名となっている。また、この他に4名の合格者があり10月までに着任する予定である。量研では一人でも多くの邦人職員を送り出すため、2時間程度のITER職員募集セミナー（年間3～4回）と、30分間のクイックレッスン（毎月開催、ショートセミナーから改称）を開催している¹⁾。

6月のセミナーではITER機構職員3名を講師に招き、職務記述書（Job Description）と自身経歴との違いをどのように克服したのか、などの説明を行った。また、クイックレッスンとして4月にITER計画の説明、5月に職務記述書の見方やITER特有の英語力について説明を行った。職員募集セミナー、クイックレッスンは誰でも匿名で参加できるので、ITER機構職員応募を検討している方は是非参加していただきたい。

量研では学生に対してもインターン等の応募支援を行っている。高専生（当時）の高橋陽太氏がトビタテ！留学Japanを利用してITER機構等のヨーロッパの核融合機関を訪問した記事が、「留学大図鑑」に掲載された²⁾（図5）。インターンに興味のある学生の皆さんは国内機関窓口へ問い合わせを欲しい。

1) ITER 機構職員応募セミナー

<https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/staff/seminar.html>

2) トビタテ！留学Japan 留学大図鑑

<https://tobitate.mext.go.jp/zukan/detail-2773>

（量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門）



図5 トビタテ！留学Japan 留学大図鑑。