



プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

5. ITER NBTF 電源高電圧機器の製作

5. Manufacturing of the ITER NBTF Power Supply Components

渡邊和弘, 前島哲也, 柏木美恵子, 戸張博之, 柴田直樹,
山中晴彦, 照沼勇斗, 梅田尚孝, 大楽正幸, 花田磨砂也

WATANABE Kazuhiro, MAEJIMA Tetsuya, KASHIWAGI Mieko, TOBARI Hiroyuki,
SHIBATA Naoki, YAMANAKA Haruhiko, TERUNUMA Yuto, UMEDA Naotaka,

DAIRAKU Masayuki and HANADA Masaya

* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2016年1月13日)

ITER 計画の下, 実機と同一性能の ITER 中性粒子入射装置 (NBI) 実機試験施設 (NBTF) をイタリア・パドバの RFX 研究所に建設している。この計画では直流 1 MV, 60 A, 1 時間連続出力の NBI 電源システムの製作を原子力機構と EU で分担している。原子力機構は直流 1 MV の超高電圧電源の主要機器を担当しており, これまでに 200, 400, 600 kV 部の直流発生器の製作を完了した。また, 全長が 100 m におよぶ 1 MV トランスミッションラインの 80% を完成させた。これらを第 1 便として RFX 研に輸送し, 2015 年 12 月から据付け工事を開始した。

Keywords:

ITER, neutral beam, NB, NBTF, 1 MV dc ultra-high voltage, 1 MV insulating transformer, power supply

5.1 はじめに

ITER (国際熱核融合実験炉) プラズマの加熱と定常維持のためのプラズマ電流駆動装置の一つである中性粒子ビーム入射装置 (NBI; Neutral Beam Injector) には, これまでのトカマク装置に必要とされたビームのエネルギーの 2 倍にあたる 1 MeV という高エネルギーで, かつ中性粒子ビームの一次粒子である負イオンビームも単機あたり 40 A, そして発生パルス幅が 3600 秒のほぼ定常動作に等しい高い性能が要求されている。このような NBI 装置に先立って, イタリア・パドバのコンサルツィオ RFX 研究所に実機と同一性能の NB 実機試験施設 (NBTF) を建設することが 2009 年 12 月の ITER 理事会で承認された。日本原子力研究開発機構 (原子力機構) は, ITER 機構や NBTF 建設サイトである RFX 研究所と機器の要求性能やインターフェース条件の協議を進め, 調整合意しながら ITER 機構, EU と共同で機器の統合設計報告書を取りまとめた。これを受けて, 日本と ITER 機構の間で 2012 年 2 月に調達取決めを締結した。

NBTF は日本と EU で分担して製作する試験施設 [1] であり, 原子力機構は装置の中でも主要な部分である直流 1 MV の超高電圧機器の製作を担当し [2], EU は電源の低電圧側や制御系, ビームライン, ビーム源 (負イオン源及び加速器) を担当する。原子力機構は日本の国内機関として, 機能仕様を定めた調達取決めに従い, メーカーと設計・製作の契約を 2012 年 10 月に締結した。その後, 機器毎に最終設計報告書を作成して 2013 年 7 月から 2014 年 10 月までに

* 現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

順次 ITER 機構において最終設計レビューを行い ITER 機構の承認を経て機器の製作を進めてきた。

これまでに, 試験用電源 (TPS 1.3 MV, 10 mA 連続), 直流 1 MV の超高電圧発生器を構成する機器の一部である 3 台の直流発生器 (DCG), 及び 1 MV の出力をビーム源まで送電する伝送ライン (TL: トランスミッションライン) 全長約 100 m の内 80% の製作と工場試験を完了させた。2015 年 10 月時点で, 日本が担当している超高電圧電源機器 14 基のうちの 6 基の製作が完了し, 2015 年 10 月に第 1 便として日立港からイタリア・パドバへ輸送し, 12 月から現地での据付けを開始した。

本章では, NBTF 電源システムの概要と原子力機構の分担機器について説明し, 機器の性能や工場での試験結果の主要なものを紹介する。

5.2 NBTF 電源システムの構成と特徴

図 1 に NBTF 電源装置の全体図を示す。図面右端に各段直流 200 kV 出力の昇圧変圧器と整流器から構成される直流発生器 (DCG) 5 台が設置される。これら DCG からの 200, 400, 600, 800, 1000 kV の出力は, 過電圧抑制とリップル低減のためのフィルターコンデンサ (DCF) に接続される。安定化された出力は, 伝送ライン (TL1, 2) によってビーム源まで伝送される。伝送ラインは, DCG の整流器部から DCF を通して各段 200 kV の電圧差毎の導体を内部に有しており, 絶縁ガスである六フッ化硫黄 (SF_6) ガス 0.6 MPa (絶対圧力) で満たされ各導体の絶縁がなされる。

corresponding author's e-mail: watanabe.kazuhiro@qst.go.jp

ビーム源にて負イオンを生成して引き出すための電源は、**図1**中央の箱型の静電シールドで覆われた高電位デッキ1 (HVD1) 内に設置される。HVD1の調達にはEUが担当するが、これに電力を供給する1 MV絶縁変圧器は日本が供給する。HVD1は、負イオンを-1 MVの高電位上で発生して接地電位まで加速するために、直流-1 MVの絶縁がなされた構造であり、絶縁支柱で地面から絶縁される。供給する電力も接地電位から絶縁する必要があり、直流1 MV絶縁変圧器が不可欠となる。この絶縁変圧器は、一次-二次巻線間で直流1 MVを3600秒の長時間絶縁することが必要であるが、これまでに製作実績が無いため電源機器製作における大きな開発課題の一つであった。そこでNBTF実機変圧器の製作設計の前にITER機構から受託研究を受けて試作試験を実施した[3]。

交流（または直流短時間）の電圧印加時には、変圧器の

内部絶縁体（多層油浸紙絶縁体）である絶縁紙と絶縁油の間の電圧分担が静電容量によって決まるのに対し、長時間の直流印加時には、数千秒の時定数で多層油浸紙間の静電容量による電圧分担から抵抗値による電圧分担に移行する。このため直流長時間の電圧印加時には抵抗値の高い絶縁紙に高い電圧が掛かるようになる。この時間変化による絶縁紙への電圧の集中を防止し絶縁破壊を防ぐため、直流長時間の変化を考慮して絶縁層の寸法や構造を決定した。

さらに二次巻線出力の電位は-1 MVであり、引き出しブッシングは対地との絶縁が必要である。交流1 MVを絶縁できる碍子製コンデンサブッシングは既に開発されているが、本電源に必要な直流1 MVの長時間絶縁に使用するためには、碍子の大きさが直径約2 m、高さ約10 mとなり（**図2**左図）、これまでに無い巨大な碍子が必要となるとともに、構造の改善も必要となり製作には多大な困難が予想

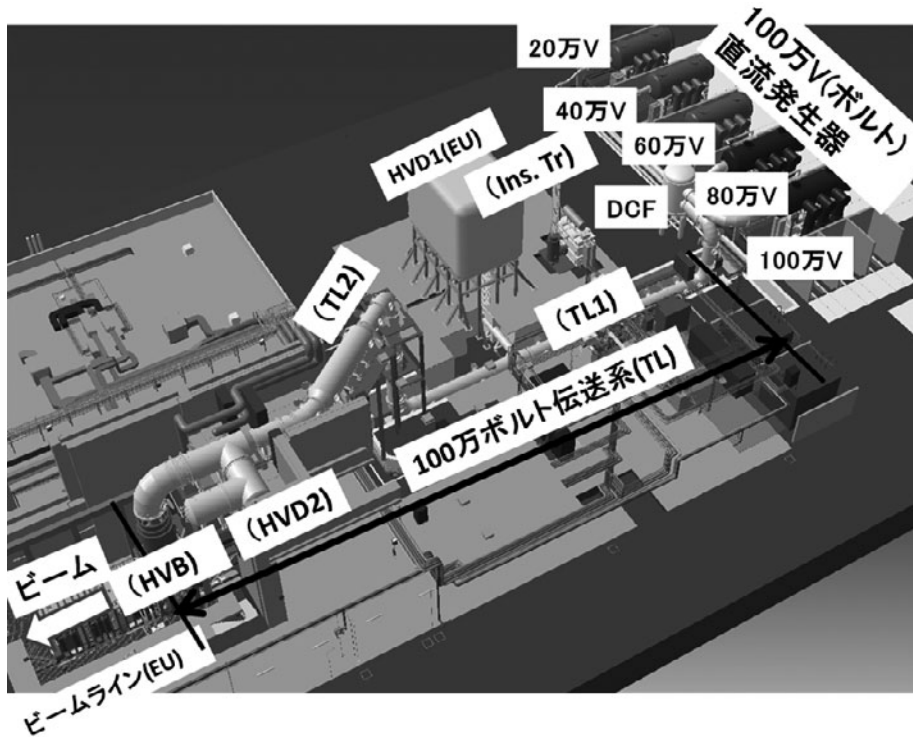


図1 ITER NB 実機試験施設 (NBTF) の概要図。

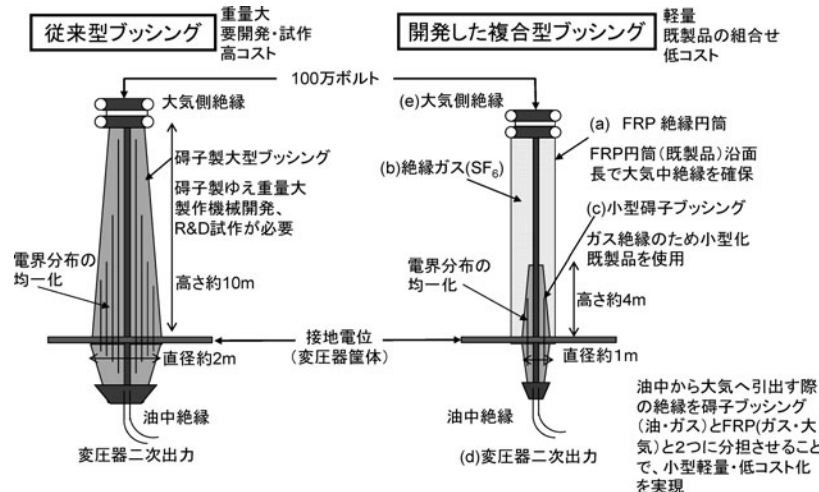


図2 従来型ブッシングと新たに開発した複合型ブッシングの比較。

された。

そこで、小型の碍子製コンデンサブッシングに繊維強化プラスチック (FRP) 絶縁円筒を被せた碍子/FRP の二重複合型ブッシングを考案し、新たに開発した (図 2 右図)。FRP (図中 (a)) の内側には絶縁ガスである SF₆ ガスを充填する (b)。絶縁変圧器の二次巻線出力 (d) は碍子製ブッシング (c) の下端と油絶縁領域で接続され、碍子製ブッシングの頂部端子は SF₆ ガス中で FRP 製絶縁円筒の頂部出力端子と接続される。FRP 絶縁円筒の内部は SF₆ ガス、外側は大気 (e) で絶縁される。大気側については、FRP 表面の沿面絶縁距離を十分に取る構造とした。このようにコンデンサブッシングで油・ガス絶縁を行い、FRP 絶縁管でガス・大気絶縁を行うように役割を分担する二重複合ブッシング構造として、さらに電界解析を実施して可能な限り一様な電界分布となるように構造詳細を決定した。その結果、内部の碍子製コンデンサブッシングは、直径 1 m 以下、高さ 4 m 以下となり、重量は 1/10 程度まで小型化を実現した。このように、1 MV の直流超高電圧に使用できる絶縁ブッシングを技術的に実証するだけでなく、同時に大幅な低コスト化と軽量化に成功した [3]。図 3 に開発した直流 1 MV 絶縁変圧器の写真を示す。下部が絶縁変圧器本体タンクであり、垂直に取り付けられているのが複合型ブッシングである。

HVD1 内に有る負イオン生成と引出しのための電源出力は、EU が担当する HVD1 の絶縁ブッシングを介して対地絶縁を保って TL2 内の 1 MV 電位の導体に導入される。HVD1 の電源出力導体・ケーブル等及び DCG からの中間電位導体の配置は、電界解析を行い TL2 の限られた空間の中でも電界集中が起らない様各導体を最適配置にした。

直流高電圧が印加される加速器で絶縁破壊を完全に抑制することが困難なため、NBI の設計では従来から絶縁破壊が発生することを許容する設計としている。つまり、絶縁破壊が発生して電源の負荷端が短絡してもそれを故障とはせず、短絡電流を数百マイクロ秒で高速に遮断し、一定時間経過後に電圧を再印加してビーム入射を継続する機能が要求されている。絶縁破壊の連続発生を抑制するには、絶

縁破壊による加速器の損傷を防ぐことが必要である。加速器の損傷は、絶縁破壊時に流入するエネルギーや電流に依存するため、それらを抑制することが必要である。このために、電源の浮遊静電容量を小さくすることで流入エネルギーの素を小さくすること、さらに、流入エネルギーを吸収して、加速器の損傷を防ぎ絶縁破壊が発生したとしても耐電圧の低下が無い、つまり絶縁破壊が連続して起らないようにすることが NBI 電源に課された大きな課題である。

NBTF 電源設備において加速器への流入エネルギーを吸収するために、コアスナバーが TL2 の終端部に設置されるが、従来のフェライトコアでは飽和磁束密度が低いために、必要なコアが膨大となる。また、周波数特性が悪く MHz の高周波では透磁率が低下して必要な性能が得られない。そこで、MHz オーダーの高周波サージにおいてもサージ抑制に必要とする透磁率や電圧時間積 (V·s) を持たせることが可能なファイナメット® コアを用いている [5]。

TL2 の終端部でビーム源の手前には、ビーム源に純水冷却水を絶縁して供給するためのウォータチョークとガス導入系を内蔵する HVD2 が接続される。純水冷却系の中にはイオン源の電極を高温に保つために 150℃ の高温水を 1 MV の高電位部に供給する必要がある。純水は温度上昇によって導電率が上昇するが、100℃ 以上の高温領域では十分なデータが無く、暗電流の過剰な増加やそれに伴う絶縁性の低下などが懸念された。そこで、セラミック管による絶縁体モデルを使用して高温高圧水を流し、180℃ までの高温領域について、抵抗率と耐電圧性能を確かめ設計に反映させた [6]。

SF₆ 絶縁ガスが満たされている TL 終端部と真空領域であるビーム源との間には原子力機構が供給する HV ブッシングが接続される。これは、-1 MV 電位にある種々の導体と 200 kV 毎の電位差のある 5 段加速器への電圧をそれぞれ絶縁して、ガス絶縁領域から真空領域へ導入する隔壁型ブッシングである。なお、ブッシングの絶縁体は内側つまり真空側が大型のアルミナセラミック円筒、外側つまり SF₆ ガス側が FRP 円筒絶縁体で構成されている [3]。その中間層には圧縮した乾燥空気を流す。これは、中間層を設けることによりトランスミッション側の SF₆ ガスがイオン源真空側に流入することを検出し防止するためである。

5.3 電源機器製作の状況

5.3.1 DCG の製作と試験

直流発生器 (DCG) には EU が用意する 150 Hz のインバータによる三相高周波交流が供給される。DCG の昇圧変圧器の三相交流出力は変圧器の上部に設置された三相全波整流器に接続され直流 200 kV が出力される。

図 4 に昇圧変圧器 (400 kV 部用) の耐電圧試験の様子を示す。耐電圧試験は、DCG 全体としては困難なため昇圧変圧器と整流器に分けて実施した、変圧器の二次出力部に試験電圧印加用のブッシングを取り付けて実施し、規定の値すなわち定格の 120% である 480 kV、1 時間保持を確認した。整流器部についても、図 5 に示すように変圧器への接続ブッシング部を介して試験電圧 480 kV を印加し、絶縁を



図 3 直流 1 MV 絶縁変圧器試作器。

確認した。

また、これら昇圧変圧器と整流器を組み合わせたの直流出力動作試験を実施し、150 Hz インバータ電源から供給した高周波交流が整流されて正常に出力することを確認した。図6に昇圧変圧器と整流器を組み合わせた写真を示す。大型の整流器を支えるために支持構造体を用いてい



図4 昇圧変圧器の耐電圧試験。

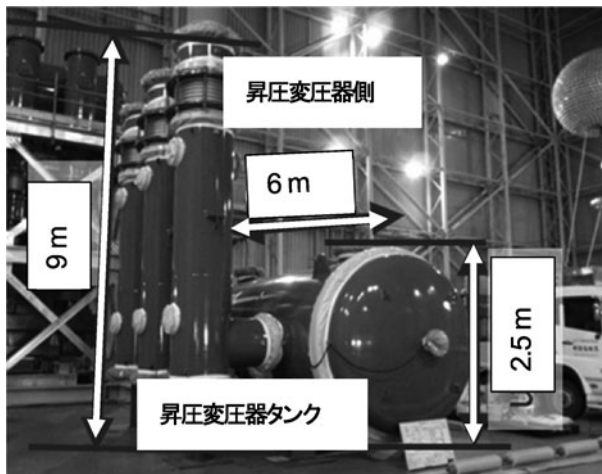


図5 DCG 整流器部の耐電圧試験。

る。NBTFではこのような形状のDCGを5台設置して1 MV 電源を構成する。

5.3.2 トランスミッションラインの製作と試験

1 MV, 60 A, 3600秒の電源の出力を負荷であるビーム源まで安定安全に送電するのがトランスミッションライン (TL) である。図7にトランスミッションラインの一部の直流耐電圧試験の様子と断面構造を示す。左側の写真は、電源機器の製作で機器の耐電圧試験に使用するための直流高電圧試験装置 (TPS: 最高電圧 1300 kV, 10 mA 連続出力) にトランスミッションラインの10 m分を接続して試験を実施している様子である。トランスミッションラインと TPS 内部には、耐電圧が最も厳しい条件である絶縁ガス圧力、すなわち NBTF 運転条件における最低ガス圧と同様に

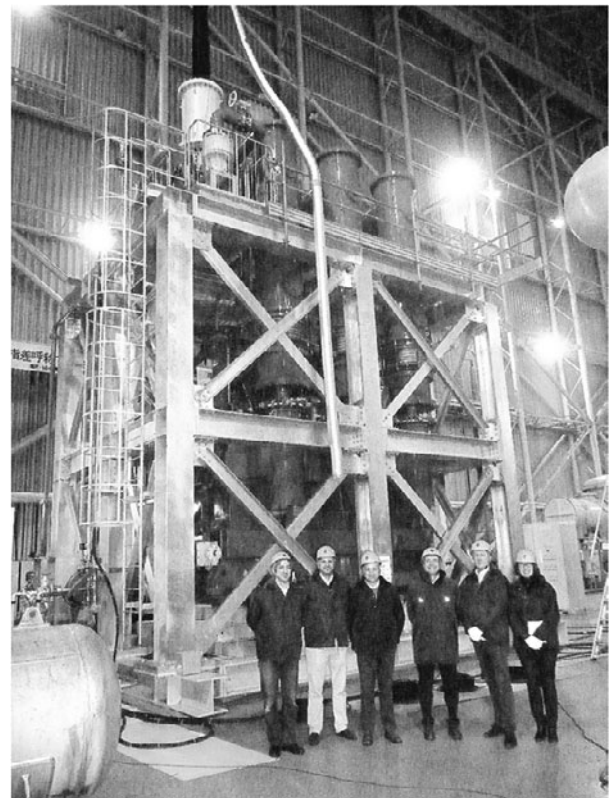


図6 DCG として組み立てた様子。

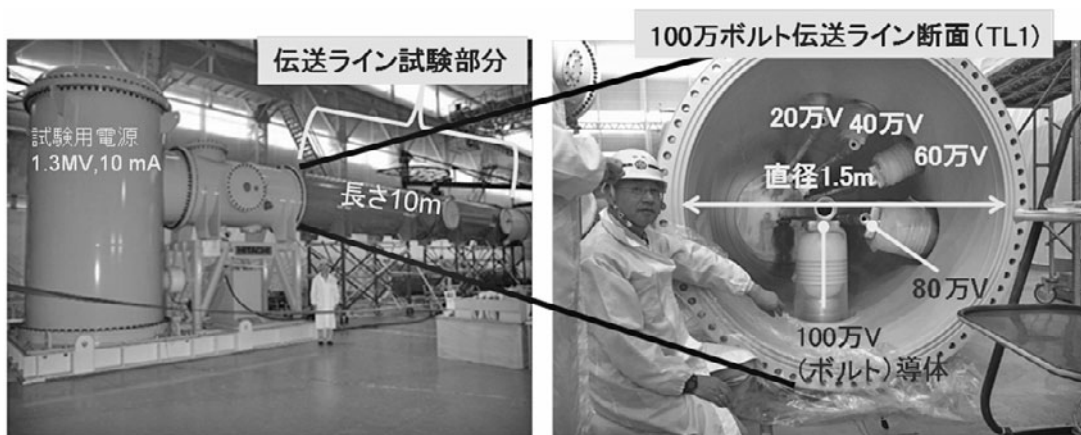


図7 トランスミッションラインの耐電圧試験と内部構造。

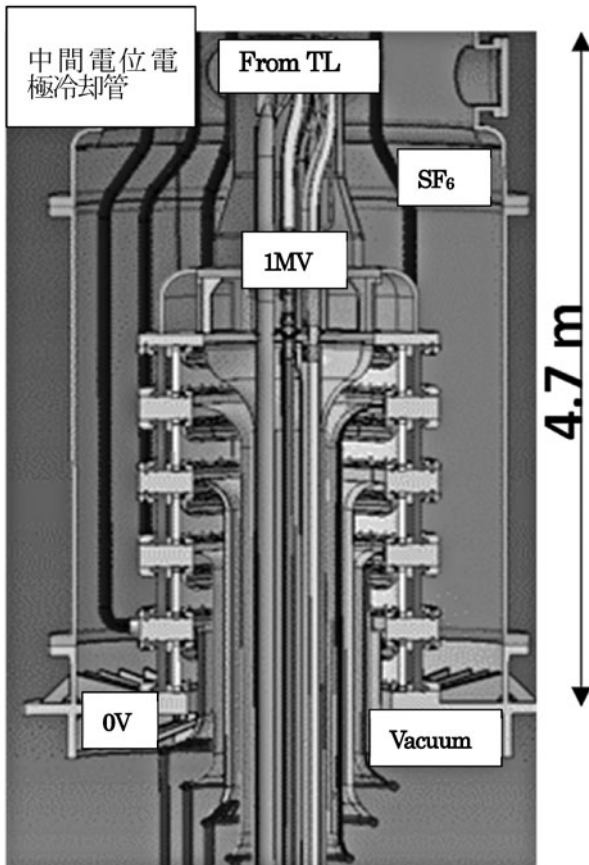


図8 HV ブッシング断面構造.



図9 HV ブッシングの外部構造.



図10 HV ブッシング内部.

SF₆ 絶縁ガス 0.55 MPa を封入した. 各中間電位導体には, TPS の出力部に設けてある抵抗分圧器によりそれぞれ 200 kV 毎の異なる電圧を発生させ同時に印加可能である,

試験の結果, ITER で要求される 1200 kV, 1 時間の安定な電圧保持を確認した. さらに, NBTF 電源システムの異常時に発生する過電圧を想定した試験である印加電圧変動試験を実施した. この試験では, 定格運転電圧 1000 kV から過電圧の 1265 kV に数秒間で上昇させ 1 分間保持した後定格電圧に戻し, これを 5 回繰り返し絶縁破壊等の異常の無いことを確認した. その後, トランスミッションラインの残りの部分の耐電圧試験を継続した.

5.3.3 HV ブッシングの製作

HV ブッシングはトランスミッションラインの終端部に取付けられ, 各種の電源出力導体の絶縁と SF₆ ガス領域と真空領域を分離するものである. 図8に断面構造図を示す. これまで, 大型セラミックの開発を初めとし, 大面積多層構造の真空中電極の耐電圧特性を明らかにするなど, R&D と設計を重ねて実現したものである.

図9に, 製作した HV ブッシングの外側面 (SF₆ 領域側) の構造を示す. 5 段に重ねた絶縁リングと各電位のビーム加速電極部に供給する冷却水配管が取り付けられている. 図10には HV ブッシングの真空側から見た写真を示す. 各電位を分担し, 冷却水をビーム源に導入する配管をサポートし, 電圧を保持するためのスクリーン電極の端部が見える. 今後, 1 MV の耐電圧性能を確認した後, パドバの NBTF サイトへ輸送する計画である.

5.3.4 輸送及び現地据付け工事の開始

製作試験の完了した電源機器は, 順次 4 回に分けてパドバまで輸送する. 第一便の主要な機器は, 200 kV, 400 kV, 600 kV の DCG とトランスミッションライン 1, さらにトランスミッションライン支持構造体を中心とする大型機器である. 図11に RFX 研究所に到着した DCG の昇圧変圧器の写真を示す. 予定通り 12 月中旬から機器の据付け工事を開始した. 図12にトランスミッションラインの一部の据付けの様子を示す.

5.4 まとめ

1 MeV, 40 A, 3600 秒の負イオンビームを発生させる ITER NB 実機試験施設 (NBTF) 用高電圧電源機器の製作を実施している. 日本での製作試験完了に従い, イタリア・パドバ RFX 研究所に 4 回に分けて輸送する. 第 1 便は, 200, 400, 600 kV の直流発生器と全長 100 m の伝送ラインの 8 割であり, 2015 年 12 月初旬に RFX 研究所の NBTF サイトに到着した. 中旬から予定通り据付け工事を開始した.



図11 イタリア・パドバRFX研究所に到着したDCG昇圧変圧器.

参考文献

- [1] V. Toigo *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **88**, 956 (2013).
- [2] 前島哲也 他：“19-096 ITER中性粒子入射装置用電源の超高電圧絶縁設計と開発” 第10回核融合エネルギー連合講演会（つくば，2014）.
- [3] H. Tobar *et al.*, *Proc. Symposium on Fusion Engineering (SOFE)* May 31-June 4, 2015, in Austin, Texas USA.
- [4] K. Watanabe *et al.*, *Nucl. Fusion* **46**, S-332 (2006).
- [5] K. Watanabe *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 4136 (1998).
- [6] 山中晴彦 他：“純水の高温領域における抵抗率変化特性の測定”，*JAEA-Technology* 2014-037.



図12 トランスミッションラインの据付け.