



プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

6. ITER 電子サイクロトロン波加熱・電流駆動システムの開発

6. Development of ITER Electron Cyclotron Heating and Current Drive System

池田亮介, 小田靖久, 梶原 健, 小林貴之, 寺門正之, 高橋幸司, 森山伸一, 坂本慶司
 IKEDA Ryosuke, ODA Yasuhisa, KAJIWARA Ken, KOBAYASHI Takayuki, TERAKADO Masayuki,
 TAKAHASHI Koji, MORIYAMA Shinichi and SAKAMOTO Keishi

* 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 (国際熱核融合実験炉) における電子サイクロトロン波加熱・電流駆動 (EC H&CD) システムは、24本の1 MW ジャイロトロンを核として、最大20 MW のミリ波ビームをプラズマに入射しプラズマの初期立上げ、主加熱、中心・周辺電流駆動、新古典テアリングモードなどの電磁流体不安定性制御を行うシステムであり、ITER のファーストプラズマの着火も担うことが期待されている。1990年代のジャイロトロン開発において多くの開発課題を克服し、現在は、ITER の要求を満足する170 GHz, 1 MW ジャイロトロンの実現に目処が付き、その調達に向けて実機製作を開始したところである。また、コルゲート導波管を中心としたミリ波伝送技術開発の進展と共に、ミリ波ビーム入射系であるランチャーの開発や、中性子遮蔽機能を有する構造物設計も進展し、ITER の水平ポート及び上ポートに取り付けるランチャーの最終設計が進められようとしている。本章では、最近のITER EC H&CD システム開発の進展と日本の調達の現状について紹介する。

Keywords:

ITER, gyrotron, launcher, transmission line, millimeter wave, control system

6.1 はじめに

ITER (国際熱核融合実験炉) における電子サイクロトロン波加熱・電流駆動 (EC H&CD) システムの要求性能仕様は、プラズマ中に170 GHzのミリ波ビームを20 MW入射するというものであり、主加熱、中心・周辺電流駆動、新古典テアリングモード (NTM) などの電磁流体不安定性制御を目的として使用することが計画されている。特に、EC

H&CDはプラズマ初期立上げに用いられることから、ITER ファーストプラズマに唯一必要とされる加熱システムとして期待されている。図1にITER EC H&CDシステムの構成を示す。大電力ミリ波発振源であるジャイロトロン [1, 2], そのミリ波ビームを真空容器近くまで伝送するコルゲート導波管などにより構築される伝送系、そして、20 MW のミリ波ビームパワーをプラズマへ入射するラン

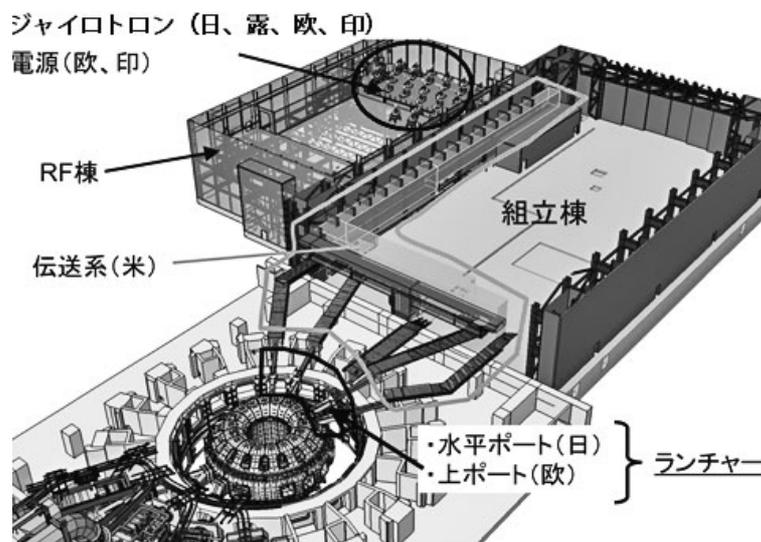


図1 ITER EC H&CD システムの構成と調達極。

* 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

corresponding author's e-mail: ikeda.ryosuke@qst.go.jp

チャーから成る。ジャイロトロンは、日本とロシアがそれぞれ8本、欧州が6本、インドが2本で計24本を調達し、それぞれのジャイロトロンは、別途、欧州とインドによって調達される高電圧電源により駆動される。ジャイロトロン出力は、米国が調達する伝送系に結合し、最終的に真空容器ポートに設置するランチャーへと結合される。日本は水平ランチャーを1基、欧州は上ランチャーを4基、それぞれ調達する。

1990年代のITER工学設計活動におけるR&Dのひとつとして、100 GHz帯ジャイロトロンの開発が進められ、それと共に大電力ミリ波伝送技術やミリ波ビームパワーの入射アンテナであるランチャーの機器開発や設計も順調に進展してきた。日本原子力研究開発機構（原子力機構）におけるITERジャイロトロン開発においては、コレクター電位降下（CPD: Collector Potential Depression）を用いたエネルギー回収技術による総合効率50%の達成[3]、高次体積モード発振による170 GHz、1 MW発振の成功[4]、ジャイロトロンへの人工ダイヤモンド窓の搭載[5-7]などにより様々な技術課題が克服され、1 MW/800秒というITERの要求を満足する長パルス運転を実証している[8,9]。2013年9月には、日本はITER機構と調達取決めを締結し、2015年1月に最終設計を確定して、機器の製作を開始している。ランチャーについては、中性子遮蔽構造を必要とし、かつ20 MWという大電力を限られた空間内で取り扱うというJT-60UやDIII-Dなどの核融合実験装置におけるランチャーとは別次元の性能を有することが求められている。そのような要求性能仕様に基づく、要素機器設計・開発が着実に進展し[10,11]、今まさに最終設計をスタートする段階にある。本章では、原子力機構において進めてきたITER用ジャイロトロン、ランチャーの開発・設計、及び調達の現状を報告する。

6.2 ITER ジャイロトロンの開発・調達の現状

ITER EC H&CD システムにおける大電力ミリ波の発振システムは、1 MW級ジャイロトロン24台、同数の超伝導コイル、伝送系と取合う準光学整合器やジャイロトロン用架台などの付属機器、冷却水マニホールドなどによって構成される。

6.2.1 ITER ジャイロトロン開発の現状

図2に日本のITERジャイロトロンの外観写真を示す。ジャイロトロンは磁場中でサイクロトロン運動をする電子ビームと電磁界が相互作用するサイクロトロン共鳴メーザー効果を利用したマイクロ波発振管である[1,2]。ジャイロトロンは、発振周波数が磁場により決定されるため、共振器における発振モードに高次モードを選択することが可能で、ミリ波帯のような短い波長に対しても比較的大きな共振器を使用することができるという特徴があり、特にミリ波帯の大電力発振を得意とする。現在、ジャイロトロンは、10~300 GHzの領域で、数百 kW から2 MWまでの出力を実現している。

すでにITERジャイロトロンの基本要件性能を実証していることから、ITERにおける運転条件の実証試験を進め

ている。ITERの要求を満足する1 MW/800秒運転(図3)や、ITERにおける一日の運転状況を模擬した800 kW/600秒ショットの繰り返し運転を2週間にわたって行い、ITERにおける過酷な運転条件下でも信頼性が確保できることを実証した[12]。またITERジャイロトロンは、NTM抑制を目的に最高5 kHzまでの高速パワー変調が要求されているが、原子力機構では変調技術の開発も進めた[13]。日本が調達するITERジャイロトロンは、三極管電子銃を持つ形式となっており、アノードとカソード間の電位によって電子ビーム電流を制御することが可能である。特に、ア



図2 170 GHz 1 MW ジャイロトロン外観。

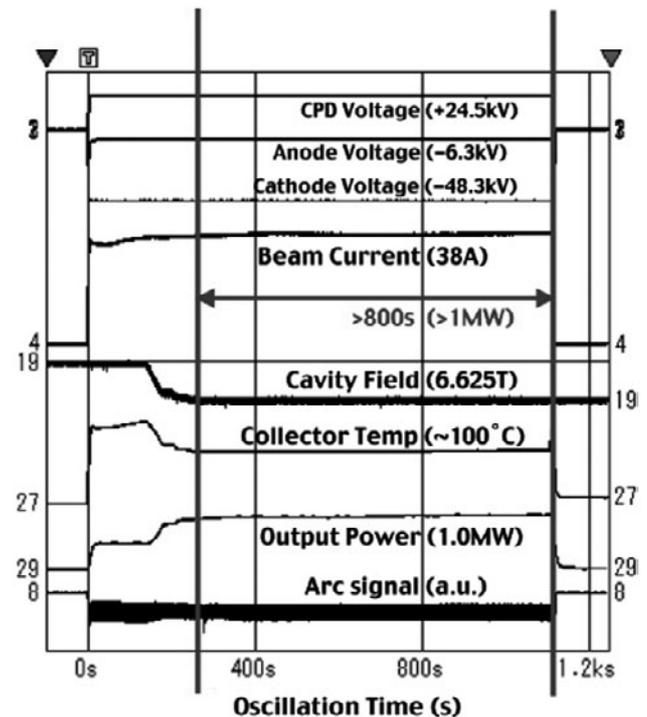


図3 ジャイロトロンの長パルス運転波形[9]。

ノードとカソード間を短絡させることにより、電子ビームを完全に停止させることができる。数十 A におよぶ電子ビーム電流を主電源で制御する方式に比べて、アノードとカソード間の短絡回路にはわずかな電流しか流れないため半導体ベースのスイッチ回路が適用でき、簡略なシステムで変調運転を実現することができる。

原子力機構では、図4に示すアノードスイッチを用いた変調システムを導入し、ITER ジャイロトロン的高速パワー変調の実証実験を行ってきた。数 kHz の高速変調の場合、各パルスの発振時における競合モードを抑制することが重要となる。そこで、図5に示すように、電圧の立ち上がり遷移時間を制御することによって競合モードの発振時間を数 μ 秒まで抑え、高速パワー変調を大電力で長パルス維持することができるようにした。これにより、1 MW ピーク出力にて 5 kHz でのパワー変調の60秒運転に成功し、ITER で要求される運転条件を満足する変調運転を達成した[13]。

ITER ジャイロトロンのプロトタイプ、並びに原子力機構の試験設備は、EC H&CD 機器の大電力試験のミリ波源として活用されている。例えば、ITER EC H&CD 伝送系のためのコルゲート導波管や偏波器などの伝送機器開発を米

国 General Atomics 社と共同で進め、伝送機器開発の進展に貢献した[14]。EC H&CD システム伝送系のトリチウム境界を担うダイヤモンド窓ユニットの大電力試験については、原子力機構独自の開発計画として、またドイツ・カールスルーエ中央研究所との共同研究として、大電力試験を行い、MW レベルで100秒以上の長パルス伝送を実証し、実機設計の完遂にも大きく貢献した[15-17]。このほか、ITER ジャイロトロンのプロトタイプは、トカマク環境下での運転実証試験を目的として、KSTAR の EC H&CD システムのミリ波源として韓国に貸与され、2015年には0.65 MW で50秒間のプラズマ入射を行い、電子加熱・電流駆動実験を行った[18]。

6.2.2 ITER ジャイロトロン調達の現状

日本における ITER ジャイロトロン調達の活動は、2013年9月に ITER 機構と原子力機構の間で調達取決めを交わして開始された。ITER ジャイロトロン調達の要求性能は調達極に関わらず表1のように統一されている。その調達範囲は、ジャイロトロン本体に加え、ジャイロトロン発振に必要な磁場を発生させる超電導マグネット、出力を伝送系に結合するための準光学整合器、制御システム、架台、各種補助電源類、冷却水マニホールドなどを含んでいる。これらの各機器は製作後、原子力機構において受入れ試験として、コンディショニング及び性能試験を行い、ITER 機構に納入後、現地据付け・試験を実施する計画となっている。原子力機構の ITER ジャイロトロン製作に関わる調達取決めにおいては、この工場試験、並びに据え付け後の現地試験完了までが調達責任範囲となっている。

これまでに、ジャイロトロンを構成する絶縁セラミック及びダイヤモンド窓の製作、並びに超電導マグネットの製作が進められ、2016年度よりジャイロトロン本体の製作が開始される。2016年末に実機 ITER ジャイロトロン第1号機が納入され、2017年より原子力機構において試験を実施し、ITER への輸送に備えることとなる。

この試験に向け、原子力機構のジャイロトロン試験設備は ITER の電源構成を模擬したシステムへの更新を進めており、ITER で予定される運転シーケンスでの運転をめざしている。特に、この試験設備の制御システムに ITER 制御・データ収集・情報伝達 (CODAC) システムに準拠した制御システムを導入し、ITER ジャイロトロン調達の運転シーケンスを実装して各運転シナリオを事前に模擬運転・

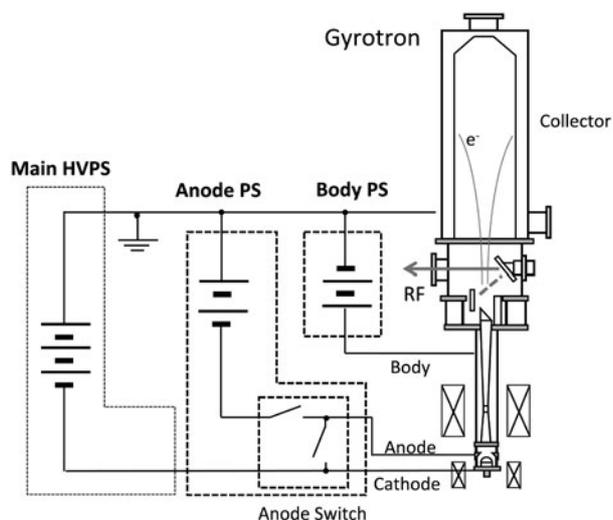


図4 ITER 用ジャイロトロン電源システムの概略。

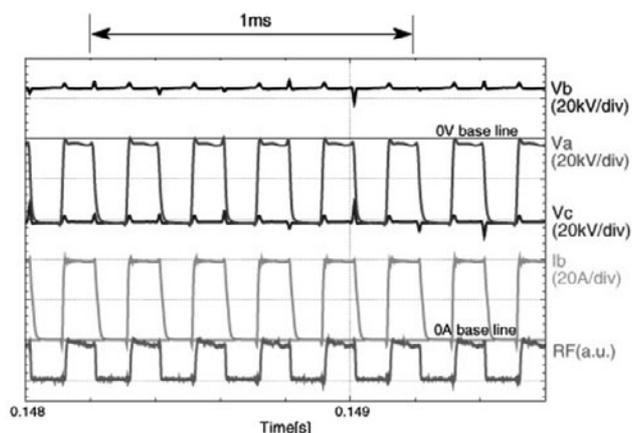


図5 変調運転の運転波形[13]。

表1 ITER ジャイロトロン調達の要求性能仕様。

要求性能項目	性能仕様
定格出力	0.96 MW (準光学整合器出力にて)
周波数	170 ± 0.3 GHz
パルス幅	3600秒
運転デューティ	25%
信頼性	95%
パワー効率	50% (CPD 運転にて)
出力ミリ波ビーム特性	>95%
HE ₁₁ モード純度	(63.5 mmφ 導波管)
0~1 kHz 変調	100%パワー変調
1~5 kHz 変調	50%以上パワー変調

試験することにより、ITERにおける実システムへの円滑な統合をめざしている[19].

以上のように、調達のための製作が進んでおり、他極が調達する機器とのインターフェースの整合性などの調整を平行して進めている。また日本が調達するITER ジャイロトロンの加速電源（アノード電源・ボディ電源）は調達極が確定していなかったが、日本が調達を担当する方向で調整を進め、2016年1月を目標に調達取決めの改正を行って、日本の調達機器とする予定である。これにより、原子力機構で試験を進めていたITERに向けたジャイロトロンと加速電源を一体とした開発の成果を最大限に反映することが可能となり、ITERサイトでの5 kHz高速変調運転が達成できる見通しである。

6.3 ITER 水平ランチャー開発・設計の現状

ITERECH&CDシステムのランチャーは、真空容器の1つの水平ポート、及び4つの上ポートのそれぞれに設置される予定で、水平ポートからは20 MW、上ポートからは1ポートあたり8 MWのパワーを入射する設計要求となっている[10, 11]. 水平ポートランチャーは日本、上ポートランチャーは欧州が調達する予定である。

6.3.1 トロイダル可変水平ランチャーの設計[10, 11]

当初、ランチャーのミリ波性能要求仕様は、1) 20 MW入射、2) ポロイダル入射方向は 0° に固定、駆動電流制御を目的として、3) トロイダル入射角可変（順方向： $20^\circ \sim 40^\circ$ 、逆方向： $-40^\circ \sim -20^\circ$ ）であった。また、将来予定しているパワーアップグレードを考慮し、ミリ波伝送ライン1本あたり1.8 MWのパワー伝送（トータル40 MW入射）を可能とする要求となっていた。図6に、トロイダル可変水平ランチャーの鳥瞰図を示す。高エネルギー中性子やプラズマからランチャー内機器を保護するために遮蔽ブランケット（BSM: Blanket Shield Module）を前方に設置し、その後方に配置したポートプラグと呼ばれるケースの内部に、ミリ波伝送機器や遮蔽構造物などが格納される。遮蔽

ブランケットは、14個のモジュールから成り、ミリ波ビームパワーを放射する3つの開口部を有する。各モジュールには、電磁力低減のための縦方向スリットが導入されている。

ポートプラグ内に設置されるミリ波伝送路は上・中・下段モジュールに分かれ、各モジュールとも8本の導波管と、固定及び回転可能な2枚のミラーから構成され、それぞれのモジュールから可動ミラーを回転させることにより、 $\pm 10^\circ$ の範囲で所定方向に6.7 MWのミリ波ビームパワーを入射する設計である。上・下段モジュールからは順方向電流駆動が、中段モジュールからは逆方向電流駆動が可能となる方向にミリ波ビームパワーを入射することができる。この他に、プラズマからの高エネルギー熱流束、及びミリ波損失、核発熱などによる機器の発熱や瞬時のプラズマ崩壊時に誘起される電磁力に対する構造健全性、中性子に対する遮蔽も不可欠で、さらに、真空容器や冷却システム、遠隔保守機器などの周辺機器との取合いにおける整合性も念頭に要素機器設計・開発を進めてきた。ランチャーの後部は伝送系機器であるコルゲート導波管と取り合い、ランチャー内のコルゲート導波管は真空・トリチウム境界である圧力閉止板を貫通する。その導波管前方に設置する固定ミラーは、対面にある可動ミラーより後方に約20 cm 下げる上に、固定ミラーの前側に遮蔽体を設置して中性子遮蔽性能を向上させる設計とした。この構造条件で、基本波（ HE_{11} モード）のみの伝送を仮定し、ミラー形状やプラズマ内のミリ波吸収位置でのビームサイズなどをパラメータとして、高効率伝送を達成すべくミリ波設計を進めた。その結果、導波管出口からランチャー出口までの伝送効率99%、1ビームラインあたりのパワーを1 MWとした場合の可動ミラー上の最大熱負荷は、 2.1 MW/m^2 となり、高効率伝送性能を維持したまま、ミラー上で低熱負荷を達成できる基本設計（図6）を確立した。

この基本設計に基づき、図7に示す水平ランチャーのミリ波伝送モックアップ（1モジュール分、順方向入射）を製作し、基本設計の有効性確認を目的とした大電力ミリ波伝送実験を行った。前節で記述したITER ジャイロトロンプロトタイプとITERで想定しているコルゲート導波管などの伝送系機器により構築したシステムをモックアップと接続し、100 kW程度のミリ波ビームパワーをモックアップに結合させた。モックアップ前方には、プラズマ吸収位置に相当する位置にミリ波吸収体スクリーンを設置してモックアップから放射されるミリ波ビームの放射分布を測定した。その結果を図8に示す。上から順に、放射設定角度を 20° 、 30° 、 40° とした時のミリ波ビーム強度分布である。ほぼ設定角度通りに放射されることが確認できた。本実験では歪んだ放射分布が観測されたが、放射分布の位相再構成によるミリ波伝播モード評価により凡そ30%程の高次モードが混在していたことが確認できており、放射分布の歪みは高次モードの影響であることも判明している。この結果は、ジャイロトロンからランチャーまでの間をできる限り高い割合（90%～95%）で基本波モードを維持して伝送させることが重要であることを意味している。原子力

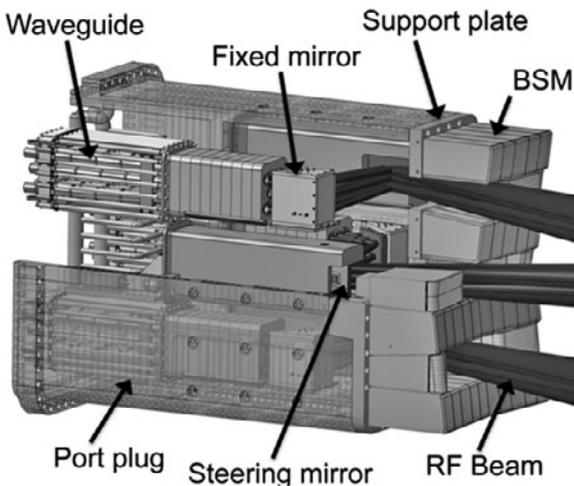


図6 トロイダル可変水平ランチャー。遮蔽ブランケット（BSM）、可動/固定ミラー、導波管等を格納するポートプラグから構成される。

機構では、まずミリ波ビーム中の伝播モード成分の割合を位相再構成計算によって定量化する手法を考案し、ジャイロトロンから出力されるミリ波ビームを伝送系（導波管）に入射角度 0.2° 以内、かつオフセット 2 mm 以内で結合させる必要があることを明らかにした[20, 21]。さらに、ジャイロトロンからランチャーまでの伝送系（導波管やマイターバンド）機器を据付ける際の高精度な軸合わせが必要であることを明らかにした。

この他にも、BSMやポートプラグについても除熱性能と耐電磁力、製作性（HIP 接合、TIG 溶接、接合検査など）を

考慮した設計を進めた。BSMの代表的な形状の設計における熱流動解析としてプラズマからの輻射熱、及び想定される核発熱（体積発熱率）を入力条件として計算した結果、構造内部で冷却チャンネルから遠い領域で 300°C 強、モジュールコーナー部で 200°C 程度の温度となることが明らかとなり、十分な除熱性能を確認できた。こうした詳細設計に基づいた水平ランチャー用遮蔽ブランケットプロトタイプ（図9）を製作し、製作性を考慮した最終設計に向けて、製作の条件や手順などのデータを取得した。

6.3.2 ポロイダル可変ランチャーへの設計変更[22]

前項のように、ミリ波ビーム入射のトロイダル方向可変水平ランチャーの設計を進め、基本設計を確立した。ところが、ミリ波ビーム入射方向をポロイダル方向可変とすることにより、プラズマ周辺部（ $\rho = 0.4a \sim 0.6a$, a ：プラズマ小半径）における電子サイクロトロン波電流駆動（ECCD）効率が倍増することが欧州の研究者らにより明らかにされ[23]、2013年9月にミリ波ビーム入射可変方向をトロイダル方向からポロイダル方向へ変更する設計変更要求がITERのベースライン設計に組み込まれた。これに基づき、現在の水平ランチャー要求性能仕様は、表2に示

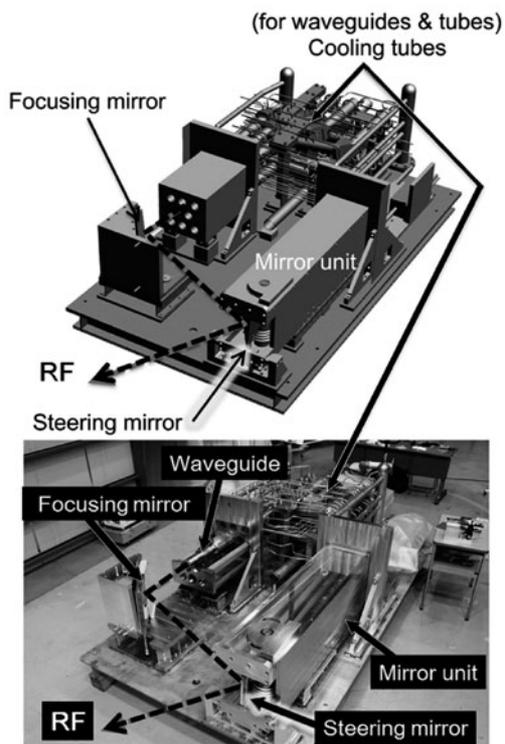


図7 トロイダル可変水平ランチャーのミリ波伝送モックアップ。上：CAD、下：モックアップ写真。

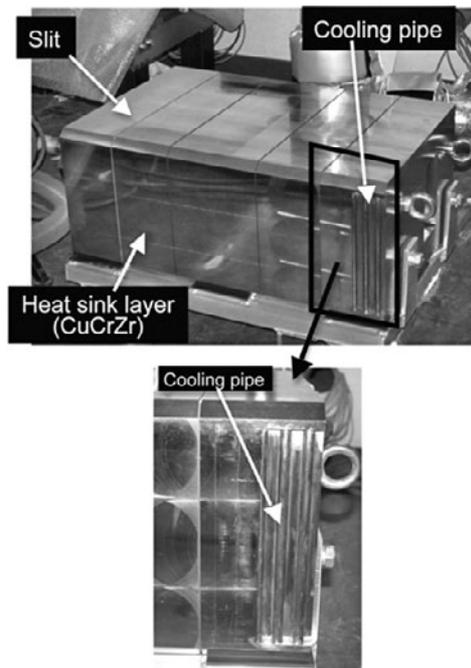


図9 水平ランチャー用遮蔽ブランケットプロトタイプ。

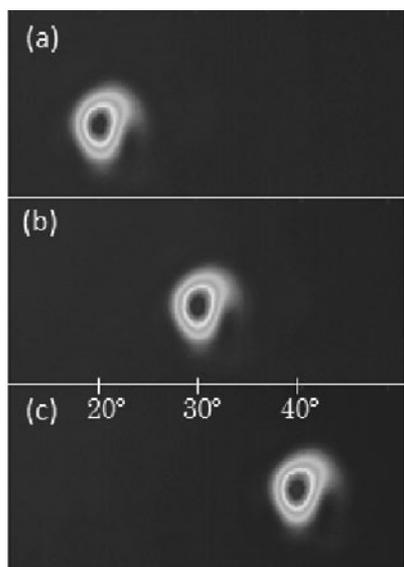


図8 水平ランチャーモックアップからの放射ビーム分布。放射角度(a) 20° 、(b) 30° 、(c) 40° 。

表2 ITER ポロイダル可変 EC ランチャーの要求性能仕様。

要求性能項目	性能仕様
伝送パワー & 周波数	1.5 MW/line & 170 ± 0.3 GHz
伝送効率	99% ($HE_{11} = 100\%$)
固定ミラー熱負荷	≤ 5.0 MW/m ²
可動ミラー熱負荷	≤ 3.0 MW/m ²
ポロイダル角度可変範囲	Top: $-10^\circ \sim +10^\circ$, counter Middle: $-5^\circ \sim +30^\circ$, co Bottom: $+10^\circ \sim +30^\circ$, co
トロイダル角度	Top: -20° Middle/Bottom: $+25^\circ$

すようにポロイダル方向可変に変更された。それ以降は、ポロイダル方向可変水平ランチャー設計の確立に向け、ミリ波伝送モジュールや遮蔽ブランケットなどの設計改良を進めている。

図10に改良設計中のポロイダル可変水平ランチャーの鳥瞰図を示す。3つのミリ波伝送モジュール構造コンセプトは維持し、かつ各モジュール8本のコルゲート導波管と、固定及び回転可能な2枚のミラー構成も維持した設計としている。一方、ミリ波ビーム入射方向については、上段モジュールからは逆方向電流駆動を可能とするトロイダル固定角度を -20° とし、中・下段モジュールからは順方向電流駆動を可能とするトロイダル固定角度を 25° とする設計に変更した。ミリ波設計手法は、トロイダル可変ランチャー時と同様に、遮蔽ブランケット開口部サイズやミラー形状・サイズ、導波管設置角度、プラズマ内のミリ波吸収位置におけるビームサイズなどをパラメータとしてミリ波伝播計算（設計）を進めた。例として、上段モジュール設計のミリ波伝送特性を図11に示す。縦軸はミリ波伝送

効率、横軸は伝送位置を表し、例えば、M1とM2はそれぞれ固定ミラーと可動ミラーの設置位置、BM1~3は遮蔽ブランケット開口部の入/出口を示している。導波管の設置角度と各ミラーの形状を調整して導波管出口からランチャーの出口に相当するBM3までの伝送効率が99%となるミリ波設計が得られている。コルゲート導波管内を伝播してくるミリ波ビームの伝送モードは、基本波(HE₁₁モード)を100%としている。また、この設計条件で、導波管内で伝播してくる可能性のある最も代表的な高次モード(HE₂₁モード)を10%考慮して伝播させた場合の伝送効率低下は、2%以内に収まることが明らかとなった。この伝送効率低下分のパワーは、ランチャー内部でミリ波が散乱し、ビームダクトを形成する内部遮蔽体やBSMで熱化するため、積極的な冷却構造を有する設計とする必要があることを示している。

遮蔽ブランケットの設計改良については、図10に示すように、ポロイダル方向可変ミリ波ビーム入射を実現するための縦方向開口を構成するモジュール配置設計を進め、有限要素解析により耐電磁力性を評価した。その結果、トロイダル可変ランチャーと同様の縦方向スリットを有する構造を維持することで、全てのBSMの回転モーメントが設計許容値以下となることを確認した。また、図10から明らかのように、中・下段モジュールから放射されるミリ波ビームは、共通の遮蔽ブランケット開口部を通る。このように遮蔽ブランケットの設計を工夫し、ビーム開口面積を縮小して中性子遮蔽性能の向上が期待できる。実際、核解析の結果から、ランチャー後方部における停止後線量率がトロイダル方向可変ランチャーより約20%低減できることも判明している[24]。

以上のように、ミリ波ビームパワー入射可変をトロイダル方向からポロイダル方向へ変更するという大きな設計変更が示されつつも、最も重要であるミリ波伝送要求を満足するミリ波設計の見直しや、中性子遮蔽性の向上を目指したランチャーの改良設計を進めており、ランチャーの最終設計確定に向けて着実に進歩を遂げている。

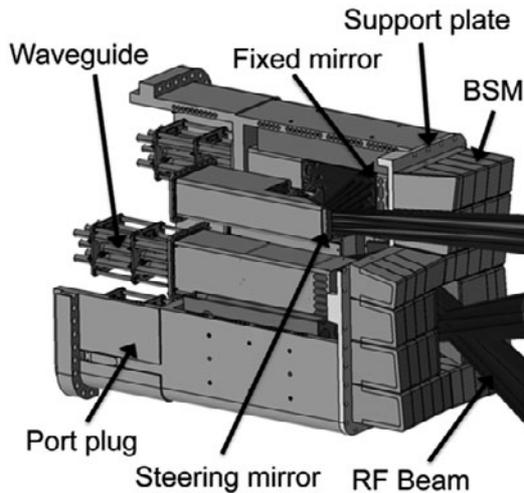


図10 ポロイダル可変水平ランチャー。

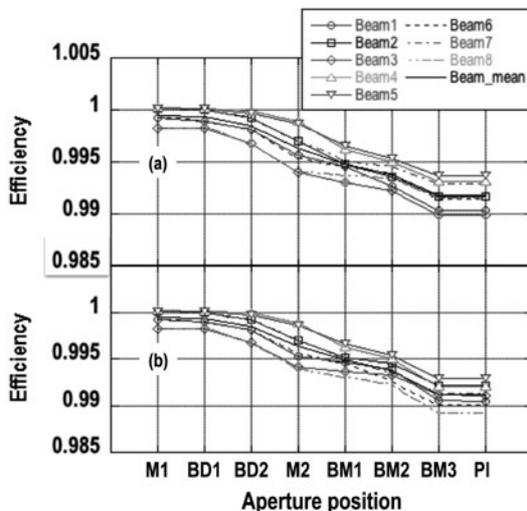


図11 上段モジュールミリ波設計におけるミリ波ビーム伝送効率。(a) $+10^\circ$ 放射、(b) -10° 放射。M1/2:固定/可動ミラー、BD1~2:ミラー間ビームダクト、BM1~3:BSM開口部、PI:プラズマターゲット。

6.4 まとめ

ITER用170GHzジャイロトロン開発においては、1MW/800秒、及び総合効率50%以上を達成し、さらに、1MWピーク出力での5kHzパワー変調運転に成功し、ITERで要求されている運転条件を全て満足するジャイロトロン開発が進展した。この結果を受けて、ジャイロトロン本体やジャイロトロン用超電導コイルの製作が開始され、ジャイロトロン本体の第1号機は、2016年12月に完成予定である。

ITER用水平ポートランチャーについては、2012年までに入射ミリ波ビームをトロイダル方向可変とする基本設計を確立すると共に、要素機器開発を進め、最終設計に向けて必要な機器製作の条件や手順などのデータを取得した。現在は、2013年9月に承認されたECCD効率向上を目的とした入射ミリ波ビームをポロイダル方向可変とする設計変更要求に基づくミリ波設計の見直しや、中性子遮蔽性能向

上をめざした改良設計を進めており、ランチャーの最終設計確定に向けて着実に進展している。

参考文献

- [1] F.A. Flyagin *et al.*, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **25**, 514 (1977).
- [2] A.A. Andronov *et al.*, Infrared Phys. **18**, 385 (1978).
- [3] K. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 3532 (1994).
- [4] K. Sakamoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **65**, 1888 (1996).
- [5] O. Braz *et al.*, Int. J. Infrared Millim. Waves **18**, 1495 (1997).
- [6] A. Kasugai *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **69**, 2160 (1998).
- [7] K. Sakamoto *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 208 (1999).
- [8] K. Sakamoto *et al.*, Nat. Phys. **3**, 411 (2007).
- [9] A. Kasugai *et al.*, Nucl. Fusion **48**, 054009 (2008).
- [10] K. Takahashi *et al.*, Nucl. Fusion **48**, 054014 (2008).
- [11] K. Takahashi *et al.*, Fusion Sci. Technol. **67**, 718 (2015).
- [12] K. Kajiwara *et al.*, Plasma Fusion Res. **4**, 006 (2009).
- [13] K. Kajiwara *et al.*, Nucl. Fusion, **53**, 043013 (2014).
- [14] R.W. Callis *et al.*, 23rd IAEA Fusion Energy Conf., Republic of Korea, ITR/P1-09 (2010).
- [15] K. Takahashi *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 85 (2013).
- [16] J. Doane *et al.*, Fusion Eng. Des. **93**, 1 (2015).
- [17] S. Schreck *et al.*, Fusion Eng. Des. **96-97**, 593 (2015).
- [18] J.H. Jeong *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 380 (2013).
- [19] 小田靖久 他：プラズマ・核融合学会誌 **90**, 365 (2014).
- [20] Y. Oda *et al.*, J. Infrared Millim. Terahertz Waves **31**, 949 (2010).
- [21] Y. Oda *et al.*, Fusion Sci. Technol. **61**, 203 (2012).
- [22] K. Takahashi *et al.*, Fusion Eng. Des. **96-97**, 602 (2015).
- [23] D. Farina *et al.*, Phys Plasmas **21**, 06154 (2014).
- [24] K. Takahashi *et al.*, 23rd International Conference on Nucl. Eng., Chiba Japan, Proc of ICON-23 (2015).