

核融合最前線

Fusion Forefront

編集・発行：日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所・六ヶ所核融合研究所

■平成27年度科学技術分野の文部科学大臣表彰

先進プラズマ研究部先進プラズマ実験グループの吉田麻衣子研究副主幹は、「核融合プラズマの回転分布決定機構の研究」において、平成27年度科学技術分野の文部科学大臣表彰(若手科学者賞)を受賞しました(図1)。

核融合炉に必要な高性能プラズマの生成と維持のためには、プラズマの流れ(プラズマ回転)の空間的な分布が重要な役割を担うことがわかってきています。しかし、このプラズマ回転の分布は、プラズマへのトルク入力に加えて、運動量の輸送やプラズマの自発回転などの過程が複雑に連関しながら決まるため、その決定機構は未解明のままです。

吉田研究副主幹は、この研究に平成17年から取り組み、プラズマ回転分布を記述する運動量バランスのモデル式を考案することで、総合的に決まるプラズマ回転分布を理解する研究方針を立案しました。そして、世界で初めて独自の「摂動実験」及びその解析手法をJT-60で確立し、それを踏まえて世界の5つの装置(Alcator C-Mod, ASDEX Upgrade, DIII-D, JET, JT-60)において主導的に実験データを解析し、プラズマ回転分布の決定機構を解明しました。

この研究成果は、将来の核融合炉でのプラズマ回転分布の予測や高性能プラズマの制御に重要な知見を与え、核融合炉の早期実現に貢献すると期待されます。



図1: 文部科学大臣若手科学者賞を受賞
「核融合プラズマの回転分布決定機構の研究」

吉田 麻衣子氏
(先進プラズマ研究部 先進プラズマ実験グループ 研究副主幹)

■超高压電源の開発による文部科学大臣表彰受賞と100万ボルト 伝送ラインの製作

ITERの中性粒子入射装置(NBI)では、高エネルギー・大電流負イオンビームを生成するために、100万ボルト、60アンペア、1時間連続出力という超高压・高出力電源システムが必要です。この電源システムの最難関機器は100万ボルト絶縁変圧器であり、とりわけ、大気中に直流100万ボルト導体を引き出すための絶縁ブッシングの製作はITER NBI実現の課題でありました。一般的に使用されている碍子ブッシングを適用する場合、碍子の長さが従来品の2倍相当の10mを超えるために、従来の技術や設備で製作することが困難でした。そこで、山中晴彦主査は、容易に入手可能な部品を用いて、碍子ブッシングと同等の機能を有する複合型ブッシングを考案しました。複合型ブッシングは、小型の碍子ブッシングに長尺の繊維強化プラスチック(FRP)製円筒絶縁管を被せて内部に絶縁ガスを充填させた構造であり、ブッシング内部の高電圧導体の周辺を小型の碍子ブッシングで、外側の大气絶縁を長尺FRP円筒管で絶縁しています。試作したブッシングを適用した絶縁変圧器はITERの要求性能を全て満足しており、ITER NBI電源の最難関機器の実現の見通しを得ました。本成果により、山中主査は文部科学大臣表彰(創意工夫功労者賞)を受賞しました(図2)。

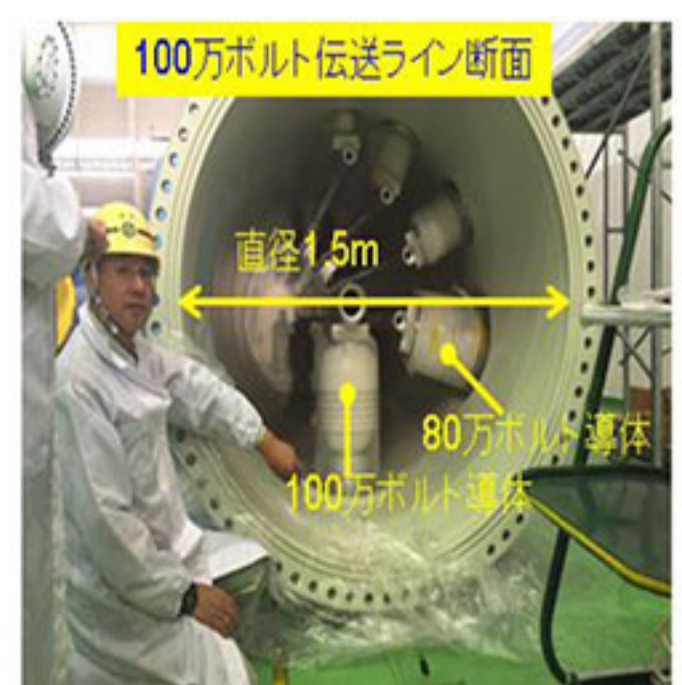
ITER NBI電源機器の製作は順調に進み、20、40、60万ボルトの直流高電圧発生器の製作を完了しました。現在、100万ボルトをビーム源まで伝送する伝送ラインの製作及び工場試験を進めています(図3)。この伝送ラインは、SF₆ガス絶縁方式であり、圧力容器である外管内に100万ボルト導体の他、20、40、60、80万ボルトの中間電位導体を内蔵しています。全長約100mのうち5割の伝送管の製作を完了し、工場試験においてITER要求性能を全て満足しました。その後伝送ラインの残りの部分の試験を完了させ、予定通り9月にイタリアの研究所RFXコンソーシアムへ輸送しました。



図2: 文部科学大臣賞創意工夫功労賞を受賞した山中晴彦主査



図3: 伝送ラインの耐電圧試験



■JT-60SAの欧州による主要機器搬入及び現地作業開始並びに真空容器の初期組立完了を披露する式典を開催 ～JT-60SAの機器製作・組立が順調に進展～

4月20日に、藤井基之文部科学副大臣並びにヴィオレル・イステイチョアイア=ブドウラ欧州連合駐日大使をはじめとする多くの日欧関係者約200名に参加頂き、JT-60SAの進捗状況を披露する式典及び見学会を開催しました(図4)。

JT-60SA計画では、欧州が機器を製作して那珂核融合研究所に搬入するだけでなく、その据付作業も担います。昨年9月にイタリアから最初の超伝導コイル用電源、本年4月よりフランスから核融合用としては世界最大級のヘリウム冷凍機システムが那珂研に搬入され、その据付作業が開始されました(図5)。加えて本年3月にドイツから超伝導コイルに電流を供給する高温超伝導電流リードも搬入されました。これにより、2013年1月のスペインからのクライオスタットベースの搬入と合わせ、欧州の全ての参加国からの機器搬入が始まりました。一方、クライオスタットベース上では、日本による組立作業として、本年1月に初期組立段階である340度までの真空容器の設置を終了しました(図6)。今回の式典では、これらの進捗を披露するとともに、多くのご来賓の方々からのお祝いの言葉とご期待を賜り、盛況のうちに終了することができました。



図4: 式典に参加頂いたご来賓の方々



図5: 輸送中の冷凍機(左)と据え付けた冷凍機(右)



図6: クライオスタットベースに設置した340度の真空容器

■JT-60SAの第4回日欧研究調整会議を開催

5月18日から22日に、第4回日欧研究調整会議(RCM-4)を那珂核融合研究所で開催しました。この研究調整会議は、日欧の研究コミュニティからの代表者が一堂に会して、JT-60SAを用いた研究の進め方とその検討のための研究協力を議論する会合で、毎年1回開催されています。今回、オンサイトの参加者は合計49名(欧州19名(7カ国12研究機関)、原子力機構25名、国内大学3名、プロジェクトチーム2名)、テレビ会議での参加は4名(欧州3名、日本1名)でした(図7)。

会合では、JT-60SAリサーチプランと関連する共同研究の進捗の報告と、今後の進め方について議論しました。また、2016年2月末を目途にJT-60SAリサーチプランの改訂版(ver.3.3)を発行すること、10件の日欧共同研究(プラズマモデリング、ペレット入射、ダイバータ排気、電子サイクロtron加熱、プラズマ計測等機器の性能評価等)を進めること等を合意しました。次回は、来年5月中旬の開催を予定しています。

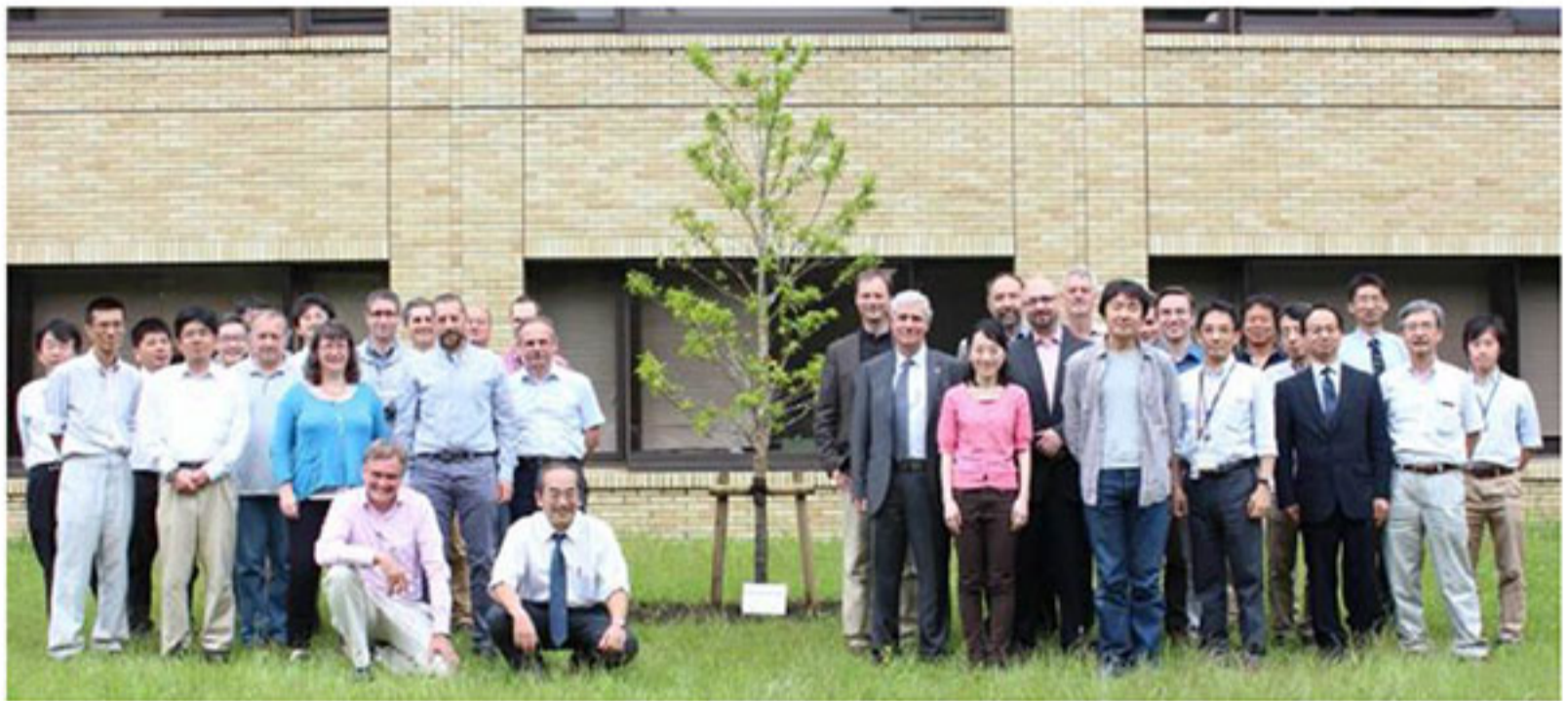


図7: 第4回日欧研究調整会議(RCM-4)の参加者

■ 駐日イタリア大使が那珂核融合研究所を御訪問



図8: 大使の出身地である、北イタリアの都市ピアチェンツァで製造された電源の前で

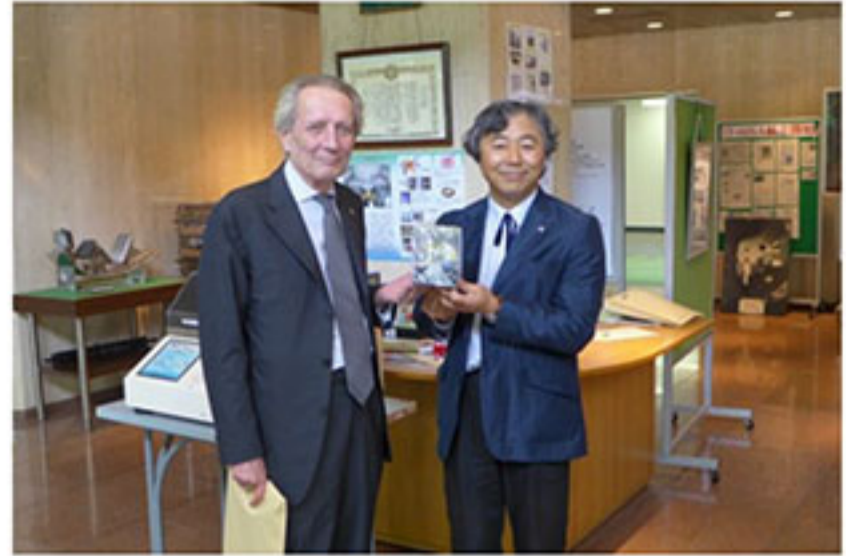


図9: 田島部門長からJT-60SAの模型を進呈

6月23日に、ドメニコ・ジョルジ駐日イタリア大使が那珂核融合研究所のJT-60SAサイトを訪問されました(図8、図9)。

大使は、JT-60実験棟で組み立て中のJT-60SA装置や、整流器棟に設置されたクエンチ保護回路を視察されました。超伝導コイルに使用するクエンチ保護回路は、イタリアの研究所RFXコンソーシアムが設計し、NIDEC ASI が製造しました。

このクエンチ保護回路に加え、イタリアの代表的な研究機関であるENEA(新技術・エネルギー・持続的経済開発機構)とRFXコンソーシアムの監督下、ASGやNIDEC ASI、OCCEM、POSEICO、Walter Tostoなど多くのイタリア企業が、幅広いアプローチ活動下で日欧共同実施中のJT-60SAプロジェクトに参加していることを原子力機構から申し上げました。大使はJT-60SA建設にイタリアが大きな貢献を果たしていることに満足され、プロジェクトが順調に進んでいることを喜んでくださいました。

■那珂市民向け施設見学会を開催



図10:解体されたJT-60の巨大なコイル群



図11:プラズマを加熱する装置のご見学

那珂核融合研究所では、6月25日に、地元那珂市にお住まいの方を対象とした施設見学会を開催し、約40名の来場者を迎えました。

本イベントは毎年行っているものですが、初めて参加くださる方にも、リピーターの方にもよりご満足いただけるようご案内コースを変える等工夫を凝らしました(図10、図11)。

参加くださった方へお願いしたアンケートでは、「また見学会に参加したい」と回答された方が大半を占め、また、「身近に感じる事ができた」とのご感想をいただく事ができました。

希望者への食堂開放や記念撮影及びその写真の当日配布等、ご好評いただいている事は継続しつつ、今回いただいた次回見学会開催時への改善策に関するご意見も反映し、今後もより良い見学会を開催していきます。

■原型炉設計合同特別チームの発足

原型炉設計合同特別チーム(以下、炉設計特別チーム)は、文部科学省の科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会に設置された核融合科学技術委員会で示された「原型炉開発の技術基盤構築を進めるための体制」において、原型炉の概念設計を実施するためのチームと位置付けられ、6月1日付けで六ヶ所核融合研究所にて発足しました。炉設計特別チームは、国の組織が方針提示と評価を通して直接関与するプロジェクトであり、オールジャパン体制の組織として産業界や大学からも多数の技術者や研究者が加わり、総勢52名(常勤19名、非常勤33名)で活動をスタートしました。

炉設計特別チームは4つのグループ(総合調整、システム設計、物理設計、安全設計)で構成され、原型炉概念設計のための基本設計作業の実施に加えて、課題解決に向けた企画立案・実施を通して、原型炉の技術基盤構築を進めていきます。

旗揚げ会合となった第1回全体会合は、六ヶ所核融合研究所で、6月18日に開催されました(図12)。オブザーバーを含めた約60名の参加者が各グループの活動計画や設計情報に関する情報共有の方針等について活発な議論を行い、新たに発足した炉設計特別チームの活動に対して期待に満ちた会合になりました。



図12: 第1回 原型炉設計合同特別チーム 全体会合の出席者(左側)と、会合での議論の様子(右側)。(六ヶ所核融合研究所 管理研究棟にて)

■JT-60SAジャイロトロンで3周波数での大電力発振を実現

JT-60SAの幅広い実験に対応するために、複数の周波数を選択的に出力できるマイクロ波源(ジャイロトロン)の開発を進めています。すでに昨年6月には2つの主周波数(110GHz,138GHz)で1MWのマイクロ波を100秒間出力することに成功し、JT-60SA向けの目標性能を満たすとともに、複数周波数ジャイロトロンとして世界最高の出力性能を実現しました。今回、同一のジャイロトロンを用いて、第3の周波数である82GHzでも1MWの大電力発振(1秒間)に成功しました(図13)。昨年得られた主周波数ではプラズマ中の電子サイクロトロン周波数の2倍に対応する共鳴層で電子を加熱しますが、82GHzでは電子サイクロトロン周波数(1倍)に対応した共鳴層で電子を加熱することが特徴です(図14)。1秒程度の短いパルス幅で効果が期待できるプラズマ着火や放電洗浄等の用途では、1倍の周波数による加熱は、2倍の周波数の場合と比べて小さなパワーでも大きな効果が期待できるので、JT-60SA用電子サイクロトロン加熱装置の適用範囲が大きく広がりました。

このジャイロトロンでは、2つの主周波数で信頼性高く長時間出力を行うことを優先的な設計目標としましたが、その条件の範囲内で第3周波数の82GHzの発振もできるように、マイクロ波反射鏡の形状を工夫して設計しました。その結果、内部損失は主周波数より若干大きいものの、1MWで1秒間の出力が見通せる設計ができました。そして今回、82GHzにおいて1MW1秒間の発振調整に成功するとともに内部損失が想定範囲内(主周波数の約2倍)であることを実測し、設計予測の正しさを確認しました。

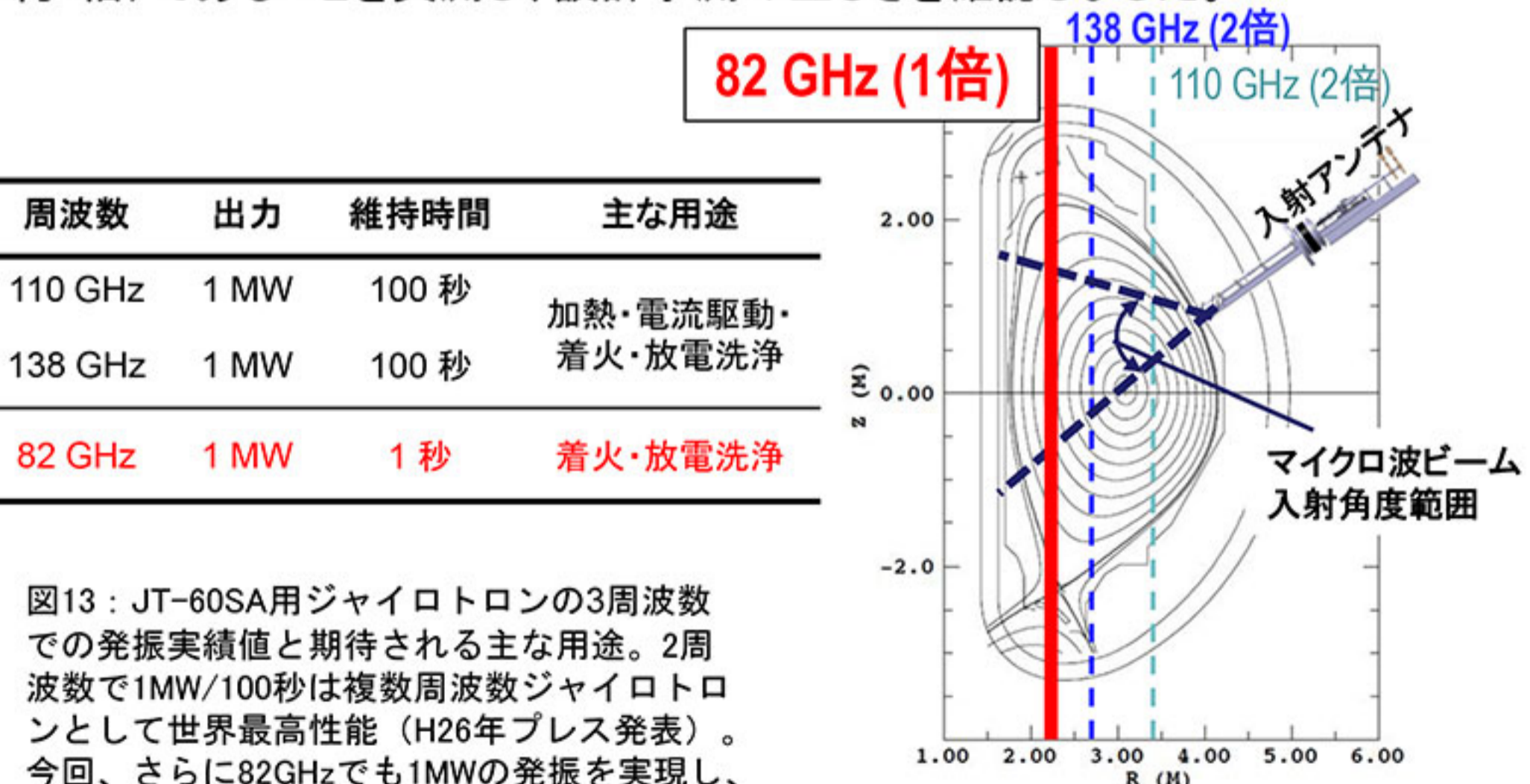


図13 : JT-60SA用ジャイロトロンの3周波数での発振実績値と期待される主な用途。2周波数で1MW/100秒は複数周波数ジャイロトロンとして世界最高性能(H26年プレス発表)。今回、さらに82GHzでも1MWの発振を実現し、幅広い実験への適用を可能とした。

図14 : プラズマ断面中の電子サイクロトロン共鳴層位置の例。82GHzは1倍の共鳴層(赤色実線)がプラズマ中に存在する。

■IFMIF原型加速器入射器水素ビームの試験を実施

日欧共同事業として六ヶ所核融合研究所ではIFMIF(以下、国際核融合材料照射施設)原型加速器による大電流ビーム加速の実証試験を進めています。今回、昨年11月より行ってきた水素イオンビーム入射器(図15)の試験において、4月30日に目標である100 keV/120 mAの連続ビームを生成することに成功しました。入射器は電子サイクロトロン共鳴型イオン源と静電加速器(定格100 keV/150 mA)(図16)及びビーム計測器や収束用ソレノイド磁石を備えた真空輸送ラインからなります。次の段階では重水素イオンビームを生成する必要があるため、放射線安全対策として必要な改修やインターロックの試運転等を行った後、再びビーム試験を開始しました。100keVの加速エネルギーで137mAが得られ(目標値は140mA)、ビームの品質を示す指標であるエミッタンス(値が小さいほど収束性が良い)は、 $0.28\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ (目標 $0.2\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$)が得られました。今後、さらに調整を進め、重水素ビーム試験での定格目標の達成を目指します。



エミッタンスメータ

図15:水素ビーム試験を開始したIFMIF原型加速器の入射器

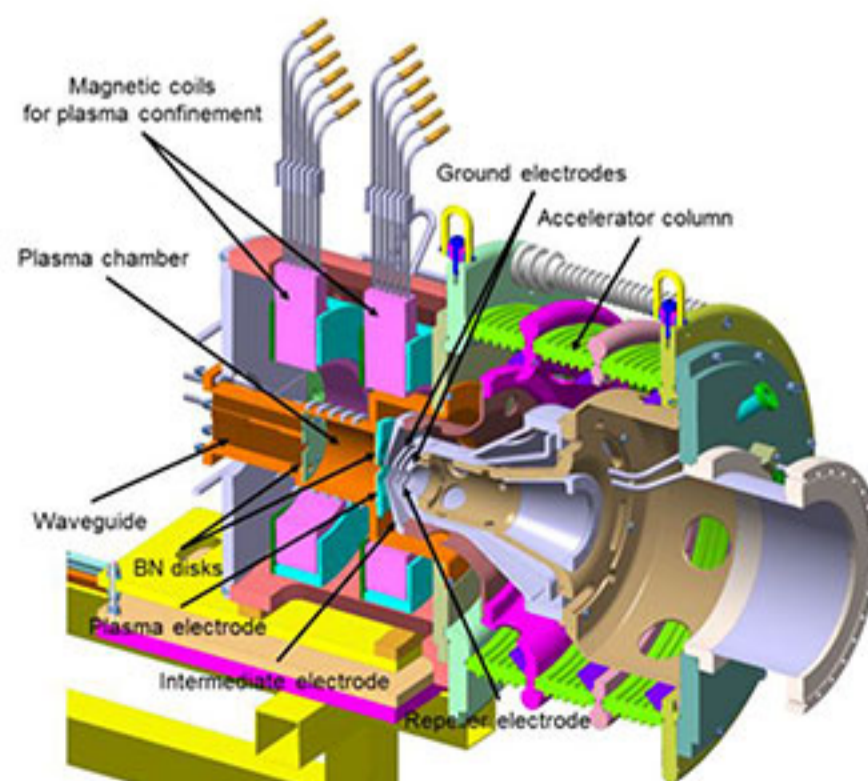


図16:電子サイクロトロン共鳴型イオン源と静電加速器

■イタリアで開催された第7回IFMIFワークショップでリチウムループのまとめを実施

5月20日から22日にイタリアのENEAブラジモネで第7回IFMIFワークショップが開催されました(図17)。本WSは2008年にドイツのカールスルーエ工科大で第1回目が開催された後、日欧で交代に開催し、7回目になります。

今回は、加速器施設を除いた、リチウムターゲット施設と試験設備施設にテーマを絞り、約40名の日欧の専門家が出席しました。1日目は主にリチウムターゲット施設の工学実証試験と工学設計が取り上げられ、原子力機構大洗研究開発センターで実施したリチウム試験ループのまとめが行われました。2日目は主に試験設備施設の工学実証と工学設計、3日目はこれまでの成果内容についての要約と整理及び日欧の将来計画として核融合炉材料研究開発用の強力中性子源計画について日欧機関からそれぞれの報告があり、今後の協力体制等に係る議論が行われました。

将来の中性子源開発に繋がる内容として、自然科学研究機構 核融合科学研究所の室賀教授からは、低放射化フェライト鋼の300°C付近のような、温度により特性が急激に変わる条件では、高精度の温度制御が必要であること、材料研究の指針はブランケットの設計に影響されるため、データの取得においては、将来の設計変更に対応できるよう、データを取得すべきとの指摘がありました。また、Ciematのイバラ氏の報告では、欧州の中性子照射施設に向けた活動を今年から開始しており、欧州の原型炉計画では、50 dpa(照射量の単位)までの照射データを取得し2030年からの原型炉の建設に備える案が示されました。日欧で独自に基本検討が進められ、今後も日欧の協力が不可欠との意見で一致しました。



図17: 第7回IFMIFワークショップ参加者集合写真(イタリアENEAブラジモネの情報センター)

■テストブランケットモジュール筐体の熱構造健全性を評価

核融合炉ブランケットはプラズマの周りに設置される機器であり、主な機能である熱の取り出し、燃料トリチウムの増殖、中性子の遮蔽についてITERの核融合環境で実証するために、テストブランケットモジュール(TBM)試験を計画しています。日本は水冷却固体増殖方式のTBMを試験する予定です。TBMは箱型構造をしており、プラズマからの熱負荷($0.3\text{MW}/\text{m}^2$)および核発熱(中性子壁負荷 $0.78\text{MW}/\text{m}^2$ 相当)、電磁力や箱を形成する壁の中を流れる冷却水の圧力(15.5MPa)などの負荷がかかります。

本研究では、熱負荷と冷却水圧力が重畳した通常運転条件におけるTBM筐体の構造健全性を確認しました。具体的には有限要素解析と圧力容器の設計基準に則った評価に取り組みました。図18にTBM筐体のモデルを示します。まず、現設計相当の3次元モデル、その断面の2次元モデルの解析結果を比較し、最大応力の発生箇所が第一壁であり、応力状態はどちらのモデルでもほぼ同等であることを確認しました。そのうえで計算時間短縮のため2次元モデルを採用し、形状修正と詳細な解析を行いました。

側壁厚さ(T)を30mm、フィレット¹⁾半径(R)を35mmとした結果、充填領域が従来より21%増え、トリチウム増殖性能は12%向上しました。そのときのミーゼス応力分布及び評価線(赤矢印Path1~7)を図19に示します。設計基準に則って肉厚方向における応力分析をするために、変形と応力分布とを考慮して破損が生じうる複数の場所に評価線を設定しました。構造材にF82Hを用いる場合、運転状態で発生する応力の最大値が判定基準値(516MPa)より小さいことから、筐体の健全性が確認できました。フィレット寸法を調整することで応力の緩和と側壁の肉厚低減を同時に達成することができ、さらにトリチウム増殖性能を向上できました。今後も解析を行い設計の最適化を進める予定です。

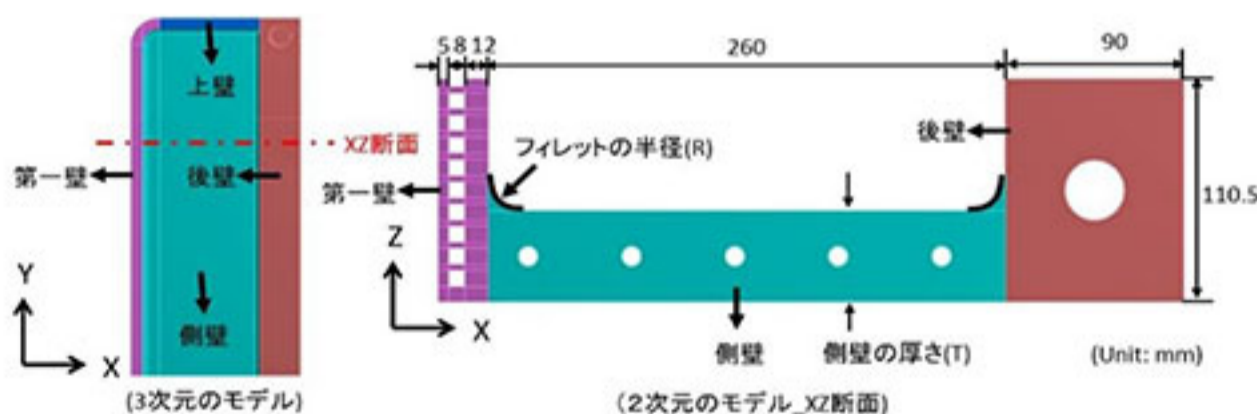


図18: TBM筐体のモデル

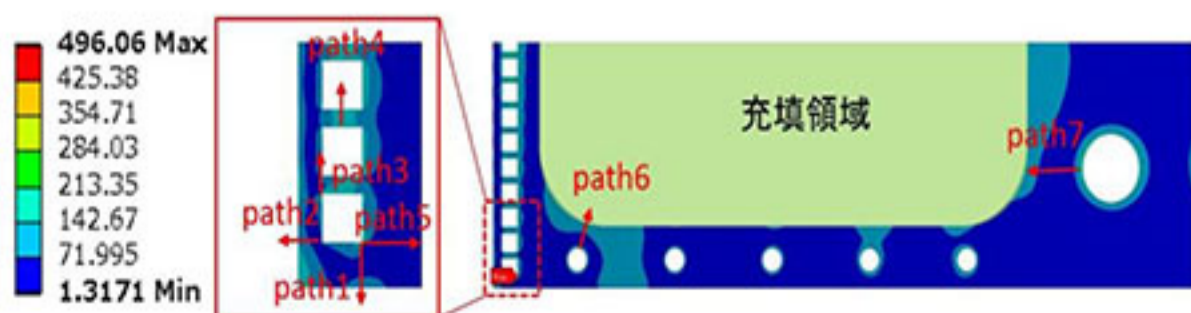


図19: 通常運転時のTBM筐体のミーゼス応力分布

1) フィレットは、溶接時に溶接材がはみ出した箇所です。

■トカマクプラズマにおける輸送障壁形成の物理機構の解明

ITERや原型炉において核燃焼プラズマを制御するためには、プラズマの輸送過程を精度よく予測することが必要とされています。最近では第一原理に基づくジャイロ運動論モデルによるシミュレーション研究もさかんに行われるようになってきましたが、制御のために必要となる非定常解析を行うためにはさらなるコンピュータの性能向上が不可欠と言えます。当面は、ジャイロ流体モデルを用いたシミュレーション研究が有力な手段と考えられます。ここではジャイロ流体モデルによる内部輸送障壁の形成のシミュレーション研究の成果を紹介します。

これまでのシミュレーションでは衝突に起因する輸送を簡単なモデルで近似して乱流輸送のみに注目し、帯状流による乱流の安定化と関連づけて内部輸送障壁の形成機構が論じられていました。帯状流により輸送障壁形成の源に関しては説明できても十分な輸送障壁の形成自体は説明できませんでした。今回、ジャイロ流体モデルに新古典流(ドーナツ形状に起因し生成される流れ)を考慮したことにより、輸送障壁形成過程のシミュレーションが可能となりました。図20に十分時間が経過した後の温度分布と径電場の分布を示します。半径 $r=0.5$ 付近に大きな負の径電場が形成され、これが乱流を十分抑制することにより、強い輸送障壁形成へ導きます。新古典流を考慮しない場合は輸送障壁の内部で径電場に細かい構造が現れ、乱流が完全に抑制されないため輸送障壁の領域自体が限定されることが明らかとなりました。

帯状流は局在化する微視的乱流自身により生成されるため、その構造はメゾスケール(巨視的スケールと微視的スケールの中間スケール)で特徴づけられます。一方、新古典流は巨視的スケールの流れを作るのでそれが存在することでより巨視的な電場構造形成へ導き、このことが輸送障壁の領域を押し広げているということを明らかにしました。本研究の成果は、核燃焼プラズマの動的制御に向けた基盤構築に資するものであり、今後の研究開発への貢献が期待されます。

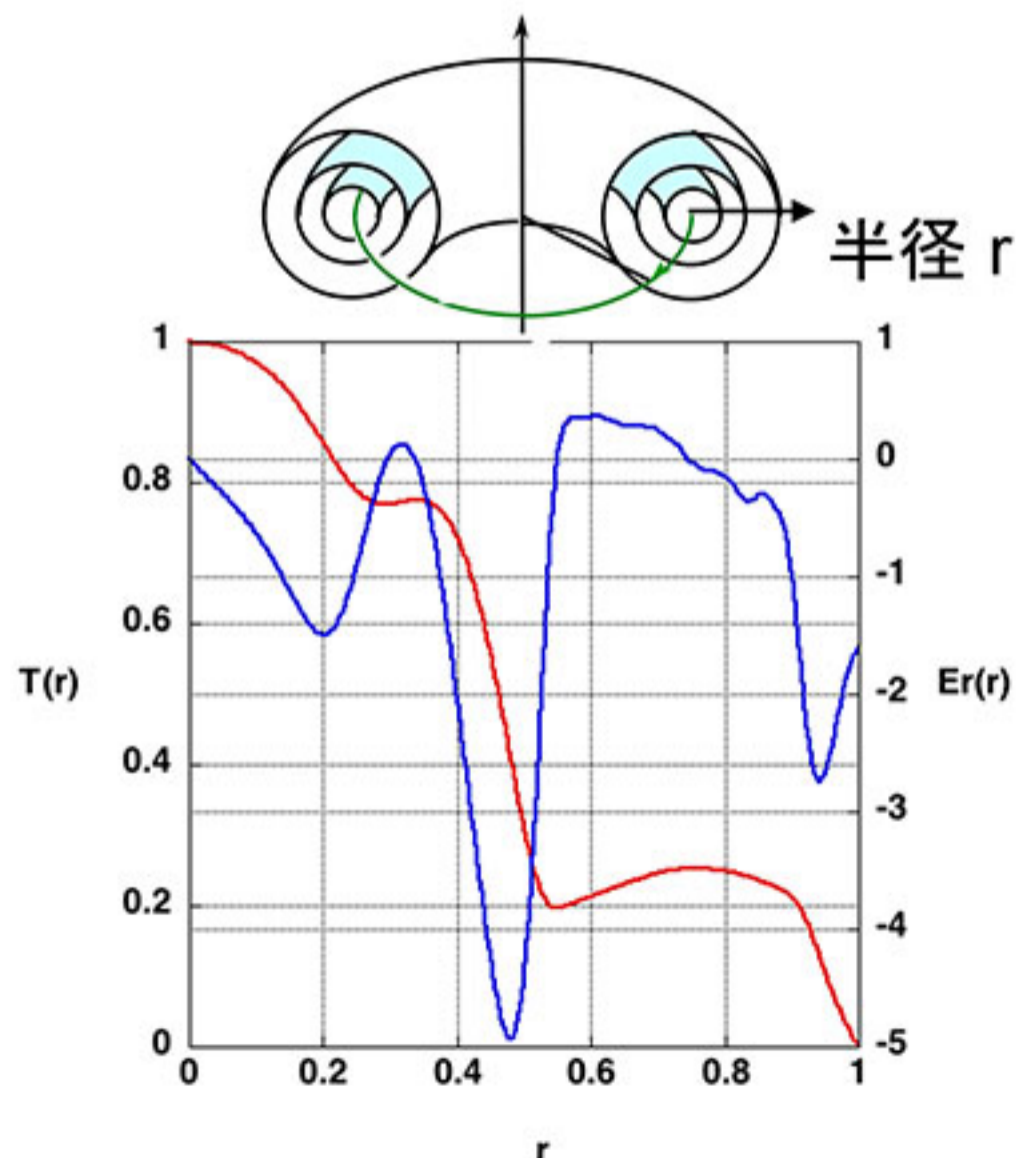


図20: 十分時間が経過した後の温度分布(赤)と径電場分布(青)

■Be-Ti-Vの3元系ベリライドの合成に成功

核融合炉燃料のトリチウムは核融合反応で生じる中性子をリチウムにあてて生産します。このとき、より効率よく燃料を生産するために中性子の数を増やす中性子増倍材が不可欠です。従来材ベリリウム¹⁾は、高温域で化学的に不安定になる欠点があり、より安定なベリリウム金属間化合物（ベリライド）²⁾の製造技術開発を進め、プラズマ焼結法³⁾により、合成すら困難であったBe-TiやBe-Vの2元系ベリライド合成に成功しました。しかしながら、Be-Ti系でBe含有率が最も高い Be_{12}Ti では、造粒の再溶融に伴う組成変化のために組成均質化熱処理を必要とする一方、Be-V系の Be_{12}V では、組成均質化熱処理を要しないがTiと比べてVは高価であることなど、一長一短です。そこで、これら2元系ベリライドの課題を克服するため、Be-Ti-Vの3元系ベリライドに着目し、これらの合成試験を開始しました。

試料は、Be、Ti及びVの原料粉末を $\text{Be}_{12}\text{Ti}_{1-x}\text{V}_x$ ($x=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$)の割合で混合し、焼結温度1273K、焼結時間20分、圧力50MPaでプラズマ焼結法により合成しました。組成割合を断面観察による各組成の面積率で比較した結果、各試料は Be_{12}Ti 、 $\text{Be}_{17}\text{Ti}_2$ 、 Be_2Ti 、 Be_{12}V 、 Be_2V 、Be相で構成され、V添加量の増加に伴い、1) Be相の面積率は増加、一方、2) Be_{12}Ti 相の面積率は減少、そして、3) $\text{Be}_{17}\text{Ti}_2$ 、 Be_2V 、 Be_2Ti 、V相の面積率は小さくて大きな変化は認められませんでした(図21)。1)の理由としては、V添加量の増加に伴い、試料溶融温度が上昇し、未焼結部であるBe相が増えたものと思われる。

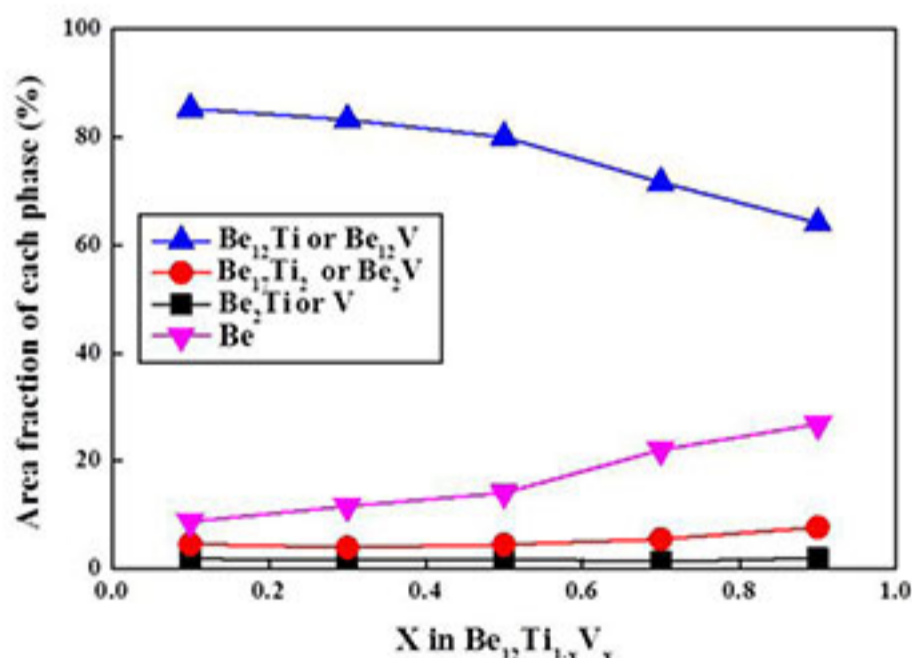


図21 : Be-Ti-V系ベリライドの組成割合

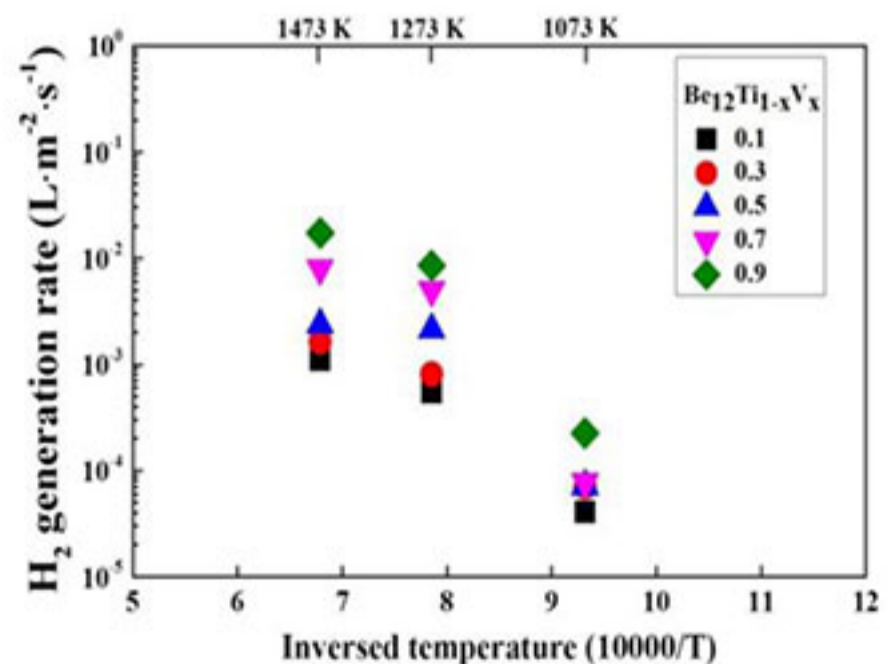


図22 : 高温水蒸気との反応による水素生成量

- 1) ベリリウム (Be) は、中性子が1個あたると2個の中性子を出し、中性子を増倍します。
- 2) ベリリウムとその他の金属によって構成される化合物で、成分元素とは異なる特有の物理、化学及び機械的特性を有しています。
- 3) 原料粉末にパルス電流を与え、原料粉末表面を活性化して焼結する手法で、簡便、短時間、低温度、高密度で延性がある脆くない材料を成型できる手法です。

これらの試料を用いて高温水蒸気との反応による水素生成量を測定した結果、Be相が多く含まれると反応性が高く水素生成量が多くなる結果を示しましたが、最も水素生成量の多い $\text{Be}_{12}\text{Ti}_{0.1}\text{V}_{0.9}$ でも、純Be金属と比較すると、1273Kでは約1/200、1073Kでは約1/10000の量であり、より安定であることが明らかになりました。今後造粒試験を進める予定です。