

核融合工学関係施設利用共同研究
平成 21 年度終了テーマ成果報告書
(共同研究)

Report on the Cooperating Researches Utilizing Fusion Engineering Facilities
Completed in the Fiscal Year 2009
(Joint Research)

核融合エネルギー工学研究開発ユニット
Division of Fusion Energy Technology

核融合研究開発部門
Fusion Research and Development Directorate

October 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

核融合工学関係施設利用共同研究平成 21 年度終了テーマ成果報告書
(共同研究)

日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門
核融合エネルギー工学研究開発ユニット

(2010 年 7 月 23 日受理)

核融合研究開発部門核融合エネルギー工学研究開発ユニットでは、トリウム安全性試験装置 (CATS)、核融合中性子源施設 (FNS)、高熱負荷試験装置 (JEBIS)、高周波工学試験装置 (RFTS)、MeV 級イオン源試験装置 (MTF)、ダイバータ受入試験装置 (DATS) の 6 つの核融合工学関係施設を用いて共同研究を実施しており、平成 21 年度は、20 件の共同研究を実施した。本報告書はそれらの共同研究の内、平成 21 年度で終了した 5 テーマの成果をまとめたものである。

本研究は日本原子力研究開発機構と大阪大学、北海道大学、東北大学、東京大学、京都大学、及びレーザー技術総合研究所との共同研究に基づいたものである。

那珂核融合研究所 (駐在) : 〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

編集者 : 西谷健夫

Report on the Cooperating Researches Utilizing Fusion Engineering Facilities Completed in
the Fiscal Year 2009
(Joint Research)

Division of Fusion Energy Technology

Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received July 23, 2010)

The Division of Fusion Energy Technology of the Fusion Research and Development Directorate is carrying out cooperating researches with universities, research institutes and industries using six fusion engineering facilities; Caisson Assembly for Tritium Safety Study (CATS), Fusion Neutronics Source (FNS), JAEA Electron Beam Irradiation System (JEBIS), RF Test Stand (RFTS), MeV Test Facility (MTF) and Divertor Acceptance Test Stand (DATS). In the fiscal year 2009 (from April 1, 2009 to March 31, 2010), 20 activities were carried out as the cooperating researches. This report reviews the results of 5 activities completed in the fiscal year 2009.

Keywords: Artificial Diamond Detector, Irradiation Effects, Functional Ceramics, Divertor, Neutron Spectrometer, Microwave, Rocket, Fatigue Test, Micro Structure

These works have been performed in JAEA as joint researches with Hokkaido University, Tohoku University, Tokyo University, Kyoto University and Institute of Laser Technology.
Editor : Takeo NISHITANI

目 次

1. 核融合プラズマ診断用人工ダイヤモンド放射線検出器の中性子応答関数測定	1
金子純一、他	
2. 機能性セラミックスに対する核融合中性子の動的照射効果	4
四竈樹男、他	
3. 核融合中性子照射下における疲労試験とその内部組織観察	7
義家敏正、他	
4. ELM とダイバータ関連ビーム照射による材料挙動の解明	11
糟谷紘一、他	
5. マイクロ波ロケットの性能向上に向けた研究	16
小紫公也、他	
付録 発表資料	19
A-1. 核融合プラズマ診断用人工ダイヤモンド放射線検出器の中性子応答関数測定	19
A-2. 機能性セラミックスに対する核融合中性子の動的照射効果	26
A-3. 核融合中性子照射下における疲労試験とその内部組織観察	32
A-4. ELM とダイバータ関連ビーム照射による材料挙動の解明	44
A-5. マイクロ波ロケットの性能向上に向けた研究	59

Contents

1. Neutron Response Function Measurement of the Artificial Diamond detector for Fusion Plasma Diagnostics	1
J. Kaneko, et al.	
2. Dynamic Irradiation Effects of Fusion Neutrons on Functional Ceramics	4
T. Shikama, et al.	
3. Fatigue Test and microstructural Observation under Fusion Neutron irradiation	7
T. Yoshiie, et al.	
4. Study on Material behaviors for ELM and Divertor Related Beam Irradiations	11
K. Kasuya, et al.	
5. Study on the Improvement of the Microwave Rocket Performance	16
K. Komurasaki, et al.	
Appendix Presented Viewgraphs	19
A-1. Neutron Response Function Measurement of the Artificial Diamond detector for Fusion Plasma Diagnostics	19
A-2. Study on Tritium Transport Process in Tritium Breeding Materials under DT Neutron Irradiation ..	26
A-3. Fatigue Test and microstructural Observation under Fusion Neutron irradiation.....	32
A-4. Study on Material behaviors for ELM and Divertor Related Beam Irradiations	44
A-5. Study on the Improvement of the Microwave Rocket Performance	59

1. 核融合プラズマ診断用人工ダイヤモンド放射線検出器の中性子応答関数測定

研究代表者：金子純一（北海道大学・大学院工学研究院）

原子力機構担当者：佐藤 聡

研究協力者（機構以外の協力者）：藤田文行（北大院・工）、鹿田真一（産総研）

研究期間：平成19年度-21年度

1.1 研究目的・意義

研究提案グループは核融合プラズマイオン温度測定用中性子エネルギー spektrometa の実用化を目指し、高品質 CVD ダイヤモンド単結晶の合成と放射線検出器の製作・評価を行っている。本研究では北海道大学ならびに産業技術総合研究所において合成した人工ダイヤモンドから放射線検出器を製作し、14MeV 中性子に対する応答関数を FNS において測定する。これにより、spektrometa としての性能評価を行うと共に、結晶内における電荷捕獲等の評価を行う。産総研で合成した試料はイオン注入をもちいた Lift-off 法により自立膜化しており、化学気相合成法によるホモエピタキシャル成長で使用するダイヤモンド単結晶基板の繰り返し利用が可能となっている。

1.2 研究方法・研究成果

合成した単結晶 CVD ダイヤモンド試料に対して電極を製作し、I-V 測定、 α 線測定といった基本測定を完了した試料を FNS に持ち込み 14MeV 中性子応答関数測定実験を行った。結晶合成は北大、共同研究先である産業技術総合研究所で行い、市販品のダイヤモンド単結晶の評価も併せて行った。

H19 年度は北海道大学において試験的に合成した厚さ 100 μm 程度の CVD 単結晶ダイヤモンドに対して並行電極を設けて、14MeV 中性子に対して感度を持つことを確認した。

H20 年度は産業技術総合研究所で合成された大型基板用 CVD 単結晶の中からえりすぐりの試料を選び出し評価を行った。その結果、 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反応によるピークの観測に成功し、エネルギー分解能 4.3%を得ることに成功した(図1)。

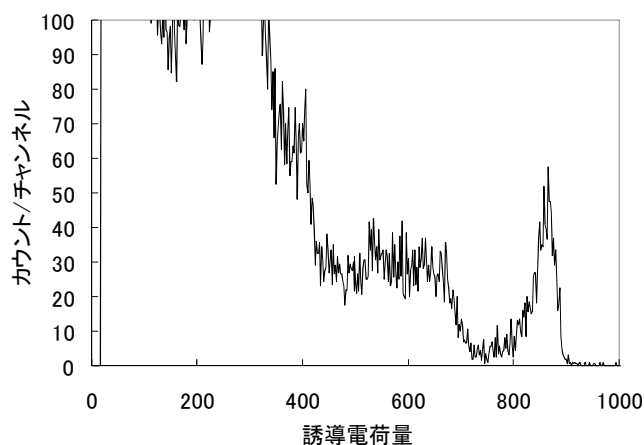


図1 産業技術総合研究所で合成され、Lift-off 法により自立膜化した CVD 単結晶ダイヤモンドによる 14MeV 中性子応答関数測定例

この結晶図 2 に示すように 10mm×10mm(ホームベース型)程度寸法をもち、メタン濃度 10% という高品質ダイヤモンド合成には一般に向かないと考えられる条件で合成された試料であるが、結晶成長と共に結晶品質が改善したことがこれまでの実験で分かっている。またエレメント 6 社製単結晶ダイヤモンドの評価を行い、こちらもエネルギー分解能 5.2%が得られた。

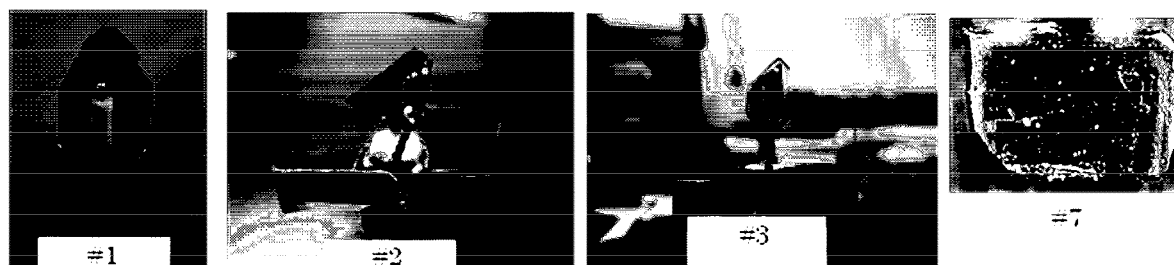


図 2 合成した CVD 単結晶ダイヤモンドから製作した放射線検出器の例

産総研製ダイヤモンドはホモエピタキシャル成長に先立ち基板表面に 3MeV で加速した 2 価の炭素イオンを 10^{16} 個/cm² 程度入射し、CVD 法により単結晶ダイヤモンドを合成後、電気化学的なエッチングにより合成したダイヤモンド層を自立膜化している。この方法ではイオン照射により合成した結晶中に構造欠陥が引き継がれる可能性はあるものの、14MeV 中性子に対して 4%台のエネルギー分解能が達成されており、H21 年度には表 1 にあるように合成条件を変え結晶を合成し、 α 線等による評価を行った。残念ながら FNS のターゲットで問題が発生し実験がキャンセルされたため 14MeV 中性子応答関数測定を行うことが出来なかった。

表 1 H21 年度実験用に準備した Lift-off 法により自立膜化した CVD 単結晶ダイヤモンド

試料	膜厚 (mm)	CH ₄ /H ₂	基板温度 (℃)	圧力 (Torr)	$\Delta E/E$ (電子)	$\Delta E/E$ (正孔)	印加電圧/ 電界 (V)/(V/cm)	備考
#1(AIST120823)	0.095	10%	900	160	4.4%	0.73%	200(21k)	同一基板 使用
#2(AIST290519)	0.08	10%	940	160	13%	1.0%	200(25k)	
#3(AIST280730)	0.2	10%	940	160	15%	3.3%	100(5k)	
#4(AIST290708)	0.1	10%	910	160	感度有	4.5%	40(4k)	
#5(AIST290722)	0.4	10%	930	160	21.7%	13.2%	250(6.25k)	
#6(E6 単結晶)	0.5	—	—	—	2.83%	2.43%	200(4k)	エレ メント6製
#7(HU025)	0.08	10%	900	160	15.7%	6.7%	150(1.88k)	北大 合成

1.4 まとめおよび今後の予定

産総研のダイヤモンドについては合成条件探索合成を行い、試料#1 で使用した基板上に 900 度、160Torr で合成したものの成績が最もよかった。次年度以降は同一条件とさらに低温で結晶を合成し複数個の検出器を準備する。また北大ではオフ角制御を行った高純度 IIa 型基板を使用して結晶合成を進めており、性能をさらに向上させた検出器を準備して 14MeV 中性子応答関数測定実験にのぞみたい。

本共同研究に関する成果リスト

- [1] K. Sato, J. H. Kaneko et al., “Evaluation of CVD diamonds for a DT neutron energy spectrometer”, ICFRM-14, (September, 2009, Sapporo).
- [2] 佐藤、垣本 他, “高速合成 CVD 単結晶ダイヤモンドによる 14MeV 中性子応答関数測定”, 原子力学会・秋の大会、2009 年 9 月仙

2. 機能性セラミックスに対する核融合中性子の動的照射効果

研究代表者：四竈樹男（東北大学・金属材料研究所）

原子力機構担当者：大西世紀

研究協力者（機構以外の協力者）：永田晋二、土屋文（東北大・金研）

研究期間：平成19年度-平成21年度

2.1 研究目的・意義

核融合炉では、機能性セラミックスが重要な働きをされると考えられる。セラミックスには優れた光学・電気的特性を有する材料が存在するが、放射線照射下においては照射誘起伝送損失や照射誘起起電力といったそれぞれの特性に対する照射効果が存在する。本研究は、これらの現象を正確に把握するとともに、実用化への指標を得ることを目的とする。

2.2 研究方法・研究成果

シリコン炭化物(SiC)は実用型核融合炉ブランケット内の中性子増倍材とトリチウム増殖材間を分離するための絶縁材料として期待されている。放射線照射された SiC の電気、熱および機械的特性の変化、すなわち各特性の照射損傷による影響について調べることは、核融合炉ブランケット設計において極めて重要である。これまで、照射された材料の基礎物性に対する照射効果について調べてきたが、照射後の欠陥の回復により材料の照射損傷を正確に評価していないこと、照射誘起欠陥形成におけるメカニズムの解明が難しいことが挙げられている。従って、照射環境下における材料の物性値計測が必要である。本研究では、日本原子力研究開発機構(JAEA)東海研究開発センターの核融合中性子源施設を利用して、放射線照射環境下における SiC の電気伝導度をその場測定し、電子伝導挙動の動的照射効果および照射誘起絶縁劣化現象について調べた。

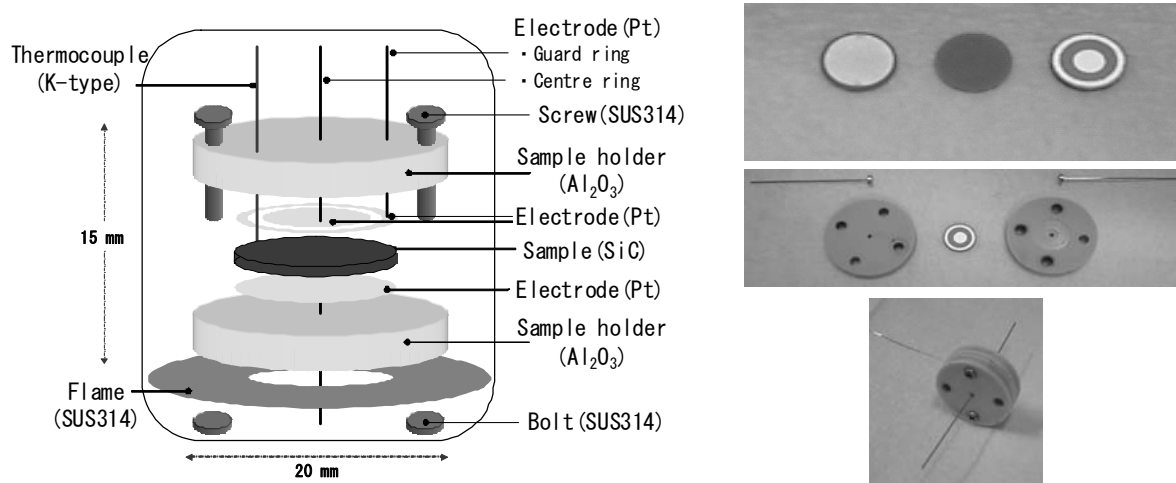


図1 放射線照射環境下におけるその場 電気伝導度測定用試験片ホルダー

作製した照射下その場測定用試験片ホルダーを図1に示す。超音波カッターを用いて、直径8 mm、厚さ1 mmのディスク状のCVD-SiC試料に切り出し、その試料片面に直径7.5 mm、

厚さ 100 nm(センターリング)、他面に直径 3mm、厚さ 100 nm および外径 7.5 mm(センターリング)、内径 5.5 mm、厚さ 100 nm(ガードリング)のプラチナ(Pt)の電極をマグネトロニオンスパッタリング蒸着装置を用いて作製した。試料片面に±30 V の電圧を印加し、他面に流れる電流を測定する。このとき、電子は試料表面を流れる可能性があり、測定した電流値は見かけ状高い値を示す可能性がある。従って、ガードリングをアースに接地し、表面を流れた電子はアースへ流れるようにして、試料バルク中を流れた正確な電流値を測定するように工夫した。また、放射線が物質に吸収されると、電子の励起、原子の回転および伸縮運動等のエネルギーに変換され、最終的に熱として放出される。従って、放射線照射下において試料温度を計測するためのクロメルアルメル熱電対(K-type)が取り付けられた。図 2 に示す様に、作製したその場測定用試験片ホルダーを中性子発生源の近くに設置し、14 MeV の高速中性子照射環境下において CVD-SiC の電気伝導度をその場で測定した。

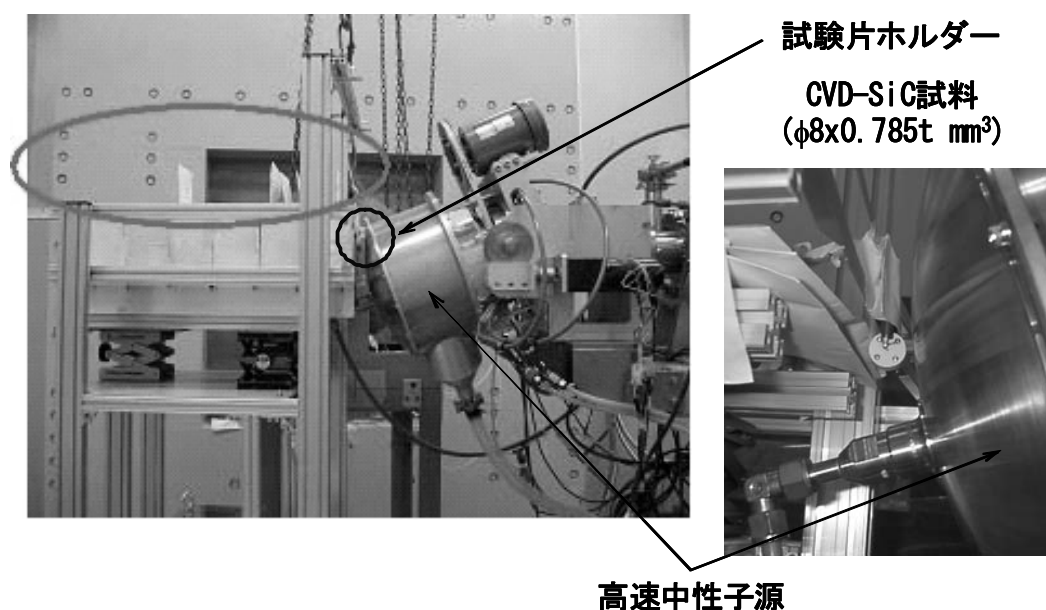


図 2 中性子照射下その場電気伝導度測定

2.3 研究成果

室温および大気中における CVD-SiC の電気伝導度を高速中性子照射量の関数として図 3 に示す。○は照射前および後、●は照射下における電気伝導度を表す。照射下における電気伝導度は照射前の伝導度よりも高い値を示し、照射誘起伝導度が観測されることがわかった。この動的照射誘起現象は、主に中性子のカスケード弾性衝突によって生成された一次弾き出し原子(PKA : Primary Knock-on Atom)が価電子帯から伝導帯へ電子を励起させることによって生じる。励起された電子は、バンドギャップ内の伝導帯近傍に位置するサブバンドに落ち、再び熱励起により伝導帯へ上がり自由電子として動き、伝導電子密度が見掛け状増加すると考えられる。また、照射後の電気伝導度は照射前の伝導度に比べてわずかに増加し、絶縁劣化が生じることも判明した。この結果は、CVD-SiC の構造および電子状態の変化が中性子のカスケード弾性衝突によって生じることを示している。

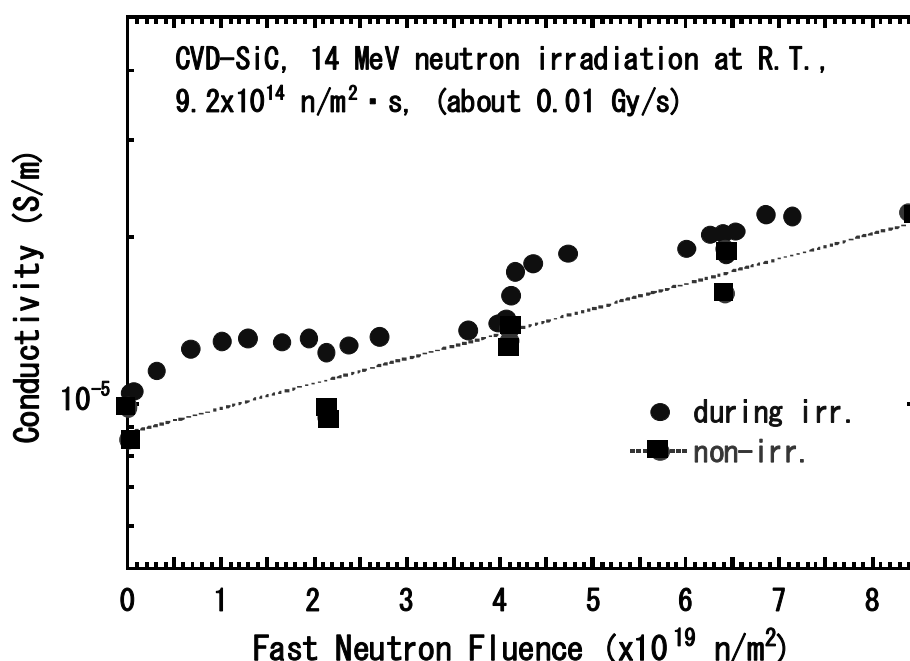


図3 高速中性子照射下における CVD-SiC の電気伝導度に対する照射量依存性

2.4 まとめおよび今後の予定

CVD-SiC の電気伝導度が室温および 14 MeV の高速中性子照射下においてその場測定された。その結果、照射誘起伝導度が観測された。また、中性子のカスケード弾性衝突による照射損傷が生じていることがわかった。今後は、この動的照射誘起効果が照射量の増加に対して、また照射温度に対してどのように変化するのか追求する予定である。さらに、紫外・可視・赤外の各波長領域における光吸収、光電子分光法による電子状態、X 線回折による構造測定を行い、中性子照射誘起欠陥形成メカニズムについて調べる予定である。

本共同研究に関する成果リスト

- [1] B. Tsuchiya, A. Morono, S. M. Gonzales, E. R. Hodgson, S. Nagata, K. Toh, T. Shikama, "Doserate dependence of radiation induced conductivity for hydrogen-doped perovskite ceramics at 473K", J. Nucl. Mater. 386-388 (2009) 342-344.
- [2] B. Tsuchiya, A. Morono, E. R. Hodgson, S. Nagata, T. Shikama, "Change in hydrogen absorption characteristic of $\text{SrCe}_{0.95}\text{Yb}_{0.05}\text{O}_3$ - d by electron beam modification", Solid State Ionics 179 (2008) 909-912.
- [3] T. Shikama, B. Tsuchiya and E. R. Hodgson, "Effects of Neutron Irradiation on the Properties of Functional Materials for Fusion Applications: Role of Hydrogen in Radiation Effects on Oxide Ceramics", J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 995-1002.

3. 核融合中性子照射下における疲労試験とその内部組織観察

研究代表者：義家敏正（京都大学原子炉実験所）

原子力機構担当者：沓掛忠三

研究協力者（機構以外の協力者）：徐虬、佐藤紘一、曹興忠（京都大学原子炉実験所）

研究期間：平成 18 年度-21 年度

3.1 研究目的・意義

核融合炉の第一壁材料や発電用原子炉の圧力容器鋼は起動、停止を繰り返すと、熱応力により疲労する。また同時に中性子により照射されるため、照射下での疲労が起きる。本研究では、FNS を用いて照射下疲労試験を行った試料と、負荷を掛けない状態で照射した試料の内部組織を陽電子消滅寿命測定及び電子顕微鏡観察によって比較することにより、照射下疲労の欠陥形成機構を解明することを目的とする。

3.2 研究方法

厚さ 0.1mm の Ni の引張試験用試料を作製し、ピエゾ素子を用いた疲労試験ステージに設置した。FNS で 1 週間、繰り返し荷重を掛けながら 1.5×10^{-4} dpa の 14MeV 核融合中性子照射を行った。試料には引張応力が加えられた状態で、振幅が 0.05% の繰返歪みを毎秒 1 回の割合で与えた。同様の疲労試験を照射なしでも行った。その後、京都大学原子炉実験所において陽電子消滅測定と透過型電子顕微鏡観察を行い、照射の有無による点欠陥形成の違いとその時の焼鈍挙動を調べた。電子顕微鏡での焼鈍温度は 423K、573K、723K である。焼鈍時間は 1 時間である。

3.3 研究成果

図 1 及び 2 に室温で 14MeV の核融合中性子照射しながら 1 サイクル/s の周期で繰返荷重を与えた時の陽電子寿命値と転位組織の焼鈍挙動を示す。図 3 及び 4 は未照射下で 1 サイクル/s の周期で繰返荷重を与えた時の陽電子寿命値と転位組織の焼鈍挙動である。照射の有無に関わらず、いずれの試料も焼鈍前は 170–180ps 程度の寿命値であり、主に単空孔が形成していた。しかし、焼鈍挙動をみると、照射下疲労された試料には単空孔が 250℃の焼鈍まで残っていたのに対し、非照射下での疲労された試料では 100℃における焼鈍で寿命値が 150ps 程度となり、転位にトラップされた原子空孔の寿命値が得られた。疲労試験においては、転位同士の切り合いでしか点欠陥が形成されないため、主に転位近傍に原子空孔が形成され、100℃で転位にトラップされたと考えられる。照射下では転位近傍だけではなく、転位のない場所においても点欠陥が形成する。そのため、原子空孔が活発に移動をはじめると 300℃まで単空孔が存在していたと考えられる。

また、過去の研究における同程度の照射量の試料と比較して疲労の有無の影響を調べたところ、疲労下での照射の方が原子空孔集合体の形成が抑制されていた。これは疲労によって導入される転位の影響であると考えられる。

照射の有無に関わらず引張歪が加えられた状態での疲労になるため、転位組織は単純引張の場合にも見られるセル組織が形成されていた。今後、今回の試料と同じ引張歪を与えて、繰返荷重を加えない場合と比較して、疲労の有無による転位セル構造の違いを調べる必要がある。

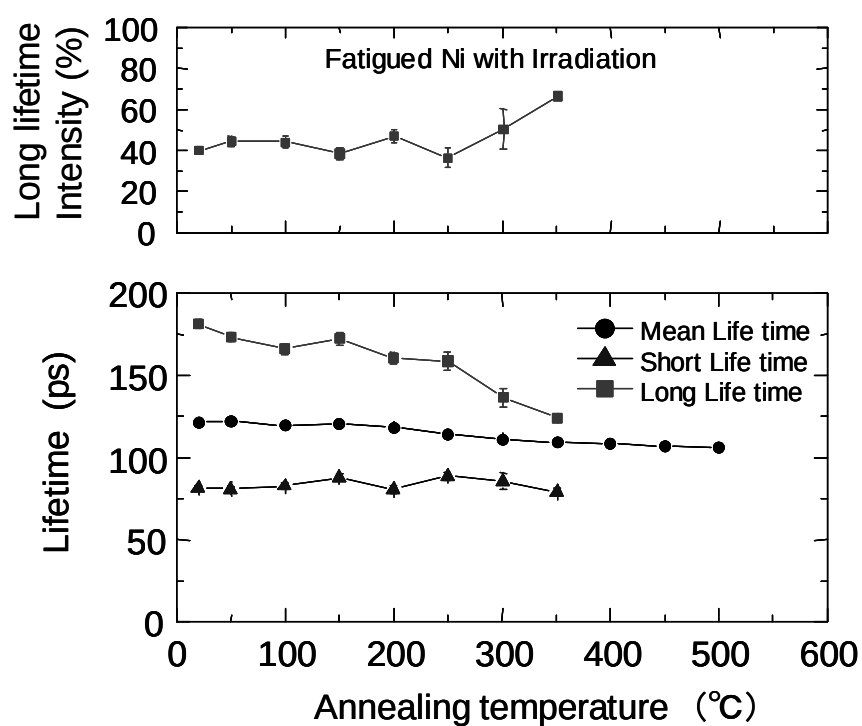


図 1. FNS を用いた 14MeV の核融合中性子照射下で、1 サイクル/s の周期で室温において疲労試験を行った試料の陽電子消滅寿命の 2 成分解析の結果

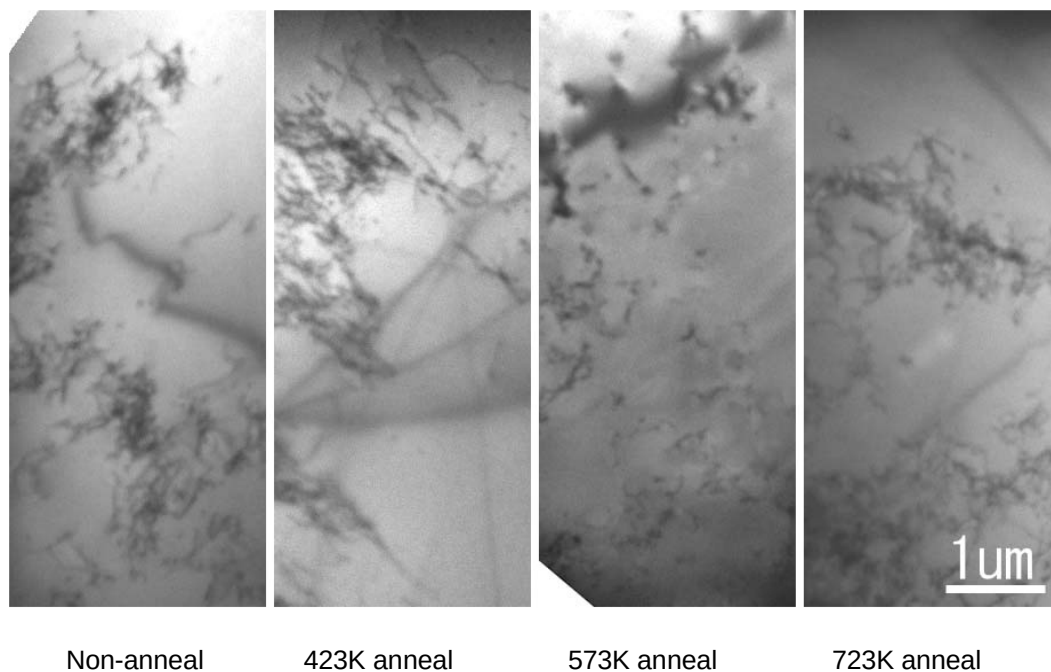


図 2. FNS を用いた 14MeV の核融合中性子照射下で、1 サイクル/s の周期で室温において疲労試験を行った試料の透過型電子顕微鏡観察結果

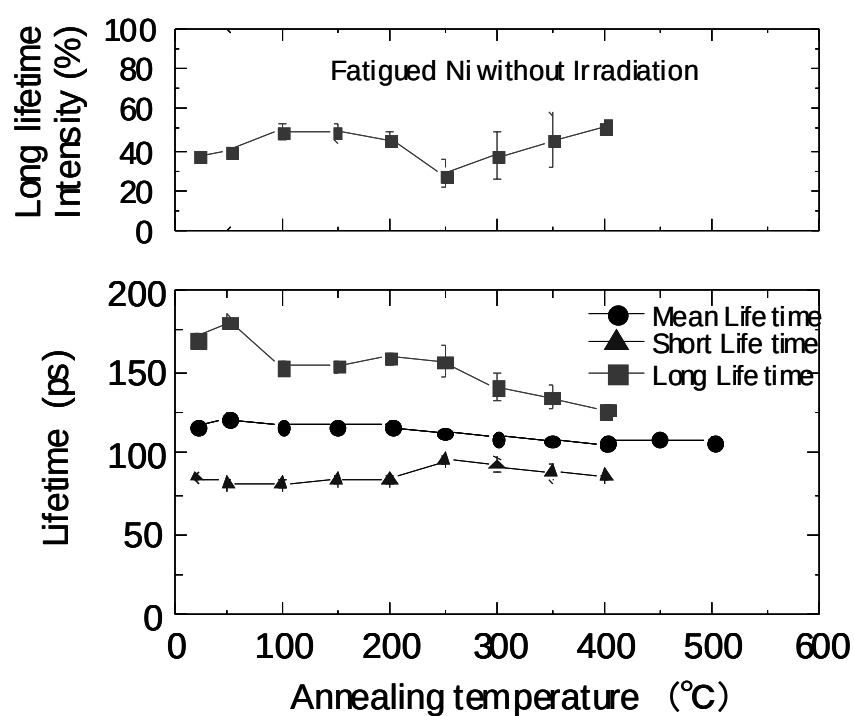


図 3. 未照射下で、1 サイクル/s の周期で室温において疲労試験を行った試料の陽電子消滅寿命の 2 成分解析の結果

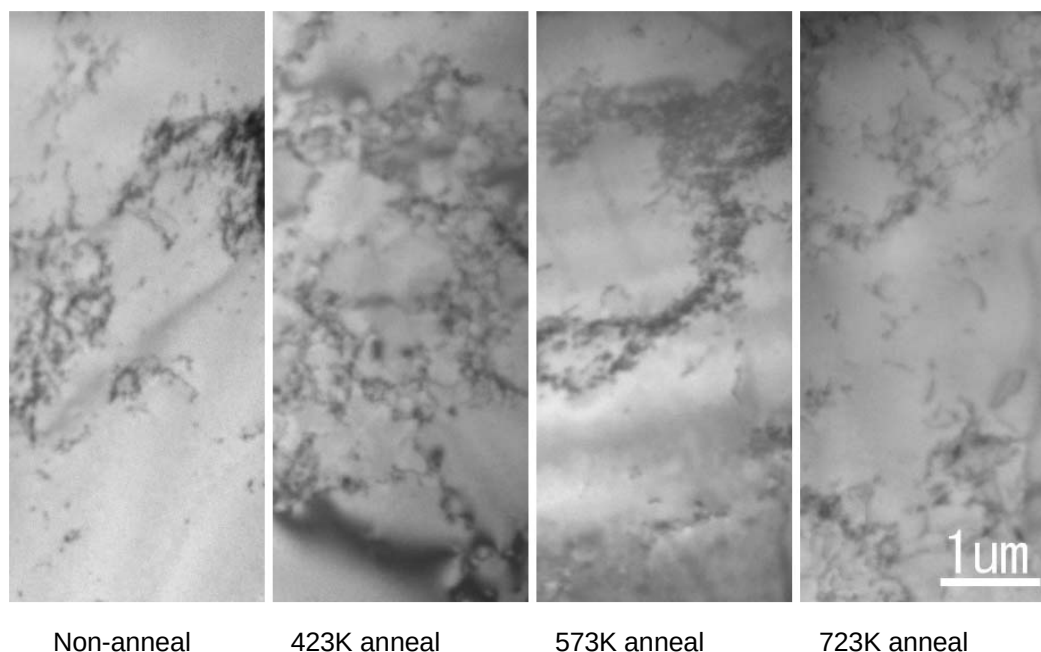


図 4. 未照射下で、1 サイクル/s の周期で室温において疲労試験を行った試料の透過型電子顕微鏡観察結果

転位組織は焼鈍によっては大きな変化は見られなかった。透過型電子顕微鏡観察結果では焼鈍温度により転位密度が異なるが、これは試料の厚さが各試料によって異なるためである。また、未照射での疲労の方が転位密度が高く見えるが、これは疲労を与える前の引張量が未照射の方が高かったためだと考えられる。陽電子消滅実験で捉えられていた微小な原子空孔集合体は電子顕微鏡観察では捉える事が出来なかった。バルク照射であることと照射量が少ないことが原因であると考えられる。

3.4 まとめおよび今後の予定

陽電子消滅寿命測定の結果から、照射下疲労では非照射下での疲労に比べて単空孔が高温まで残った。同照射量で疲労の有無の影響を調べたところ、疲労下の方が点欠陥集合体の形成が抑制された。ある程度までなら導入される転位は点欠陥のシンクとして働き、良い影響を与える。電子顕微鏡観察の結果から、疲労により転位のセル組織が形成された。今回の焼鈍温度範囲では、転位のセル構造の変化はみられなかった。また、積層欠陥四面体などの微小な原子空孔集合体も観察することができなかった。今後、KURでの照射下疲労との比較と核融合炉候補材料での照射化疲労について調べていく予定である。

本共同研究に関する成果リスト

- [1] 佐藤紘一、井上和也、義家敏正、徐虫し、若井栄一、沓掛忠三、落合謙太郎「核融合中性子と核分裂中性子を照射した金属材料の損傷構造の比較」第24回プラズマ・核融合学会、2007年11月27日。
- [2] K. Sato, K. Inoue, T. Yoshiie, Q. Xu, E. Wakai, C. Kutsukake, K. Ochiai, 13th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2007年12月11日。
- [3] K. Sato, K. Inoue, T. Yoshiie, Q. Xu, E. Wakai, C. Kutsukake, K. Ochiai, J. Nucl. Mater. 386-388 (2009) 203.

4. ELM とダイバータ関連ビーム照射による材料挙動の解明

研究代表者：糟谷紘一（レーザー総研・応用ながれ研）

原子力機構担当者：鈴木 哲、江里幸一郎、榎枝幹男、秋場真人

研究協力者（機構以外の協力者）：小澤翔（東工大、東芝）、中井貞雄、乗松孝好（阪大）、井澤靖和、古河裕之、島田義則（レーザー総研）、佐藤守彦（群大）、田邊哲朗（九大）、石原和仁（コムス）

研究期間：平成 18 年度-21 年度

4.1 研究目的・意義

JT-60SA, ITER 並びに原型炉装置に伴うプラズマ壁相互作用研究の重要課題の 1 つに、ELM によるダイバータ挙動の解明がある。本研究では、那珂研究所電子ビーム装置（JEBIS）による試験片照射を行い、ELM によるダイバータ表面の損傷など、ITER ダイバータ開発に必須の関連諸データを蓄積することを研究目的とした。より将来的には、応用ながれ研究所（横浜、群馬、大阪）と群馬大のイオンビーム装置やレーザー装置を用いて、電子ビームを含む同一サンプルへの重複照射を行い、より複雑な照射条件下での諸試験片応答解析を実施したい。

4.2 研究方法と研究成果

始めに照射した材料は、等方性黒鉛、炭素複合材（CFC）、タングステンの 3 種であった。照射時の真空度は 2×10^{-2} Pa、照射電子ビームの加速電圧、加速電流、持続時間は、それぞれ、65kV、2.00A、1ms（または 1.5ms）であった。また、電子ビームによる材料表面上への熱負荷をカロリメータにより、同時測定した（960-200MW/m²）。同一箇所への、照射回数を 1, 4（または 5）、10, 20 と変えて照射した。照射により、クレーター状の表面損耗が発生するため、その表面状態の写真撮影や表面形状測定をした。後者の結果の代表的な例を図 1 に示す。

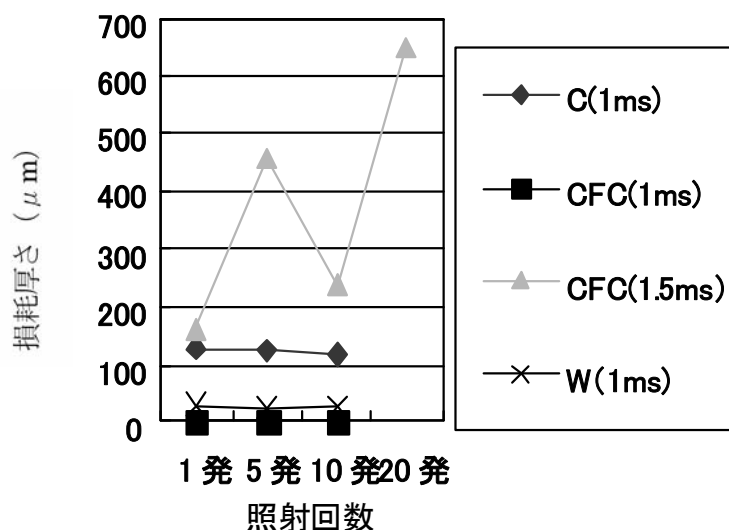


図 1 損耗厚さと照射回数の関係

形状測定ソフトウェアにより、XY 面上の任意直線に沿う表面深さ（Z 方向）情報を取得し、谷の最深部深さ（損耗厚さ）を評価した。縦座標が損耗厚さで、横座標が、同一箇所での電

子ビーム（多重）照射回数である。同図で、炭素複合材の場合には、照射持続時間が 1ms と 1.5ms の両場合について示してある。但し、ここで、照射回数 5 以上の箇所では損耗厚さの値が逆転しているのは、ビーム照射強度（熱負荷値）の再現性が、必ずしも良くないことに起因していると推測されるが、詳細な解析・検討は、今後の課題である。損耗厚さの代わりに、損耗体積の評価結果も行った。さらに、赤外線カメラによる材料表面温度の同時測定により、表面温度の定性的変化を知ることができた。また、材料表面のラマン散乱測定や X 線回折装置などを行い、表面状態を調べた。

つぎに、ELM によるダイバータ表面への熱負荷評価を行った。参考文献（どの文献が特定してください）によると、ELM による熱負荷が原因で、ITER のカーボンダイバータ表面のアブレーションが発生する閾値は、 $Q\Delta t^{-1/2}=45\text{MJm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ で計算することができる。ここで、 Q はダイバータへの ELM エネルギー密度 [J/m^2] で、 Δt は、ELM のエネルギー付与持続時間 [s] である。代表的な持続時間 3 種類についての閾値 Q を、表 1 に示す。ELM の持続時間は、これまでの所、1ms 或いは 0.1ms 程度が考えられている。那珂研の JEBIS の最大熱負荷は、最短の照射時間 1ms の時、最大 $1\text{GW}/\text{m}^2$ であるので、 Q の値は $1\text{MJ}/\text{m}^2$ となる。したがって、JEBIS により、ELM 熱負荷模擬照射ができることがわかる。表中の持続時間 100ns は、通例の ELM の持続時間に比べて桁違いに短く、上式の閾値の式が、必ずしも適用できるとは限らないが、参考のため計算した。この持続時間を取り上げたのは、当グループの強力イオンビームの照射持続時間領域に対応しており、過去の同イオンビーム照射による表面損耗の閾値（実験値）と、ほぼ一致している。

表 1 損耗発生に要する広範囲熱入力閾値

Δt (入力時間幅)	Q (エネルギー束)	
	単位 [MJ/m^2]	単位 [J/cm^2]
1ms	1.42	142
0.1ms	0.45	45
100ns	1.42×10^{-2}	1.42

さらに、上記の、照射持続時間 1-1.5ms の時のごく浅い表面アブレーション結果の不規則性のある部分の当否を再確認することも含んで、再実験を行った。ビーム加速電圧 65kV、ビーム電流 2.3A、のもとに、ビーム持続時間を 0.8ms、1.0ms、1.2ms と変化し、タングステン試料をシングルショット照射した。照射後の表面形状測定より、外挿により表面損耗開始の閾値（ビーム付与エネルギー条件）を推定することができた。その結果を図 2 に示す。これらとは異なり、熱入力と熱放散が理想的と考えられる単一表面の照射とは別に、突合せサンプル材料の境界部分の照射も試み、照射表面状態の写真撮影や表面（クレーター）形状測定を実施した。図 3 は、照射後表面の正面写真撮影結果である。また、平行して、タングステンとグラファイトの、2.3ms までの、より長持続時間電子ビームによる照射も試みた。図 4 は、表面深さ計測装置により、表面状態をより詳細に測定した結果である。図 4 の電子ビーム照射結果は、短時間幅ビーム照射の結果に比べて、クレーター深さが 1 桁程度深くなっている。また、クレーター形状は一様ではなく、クレーター外周（円環）部に、熔融後のタングステンが再凝固した盛り上がり部分も観測された。

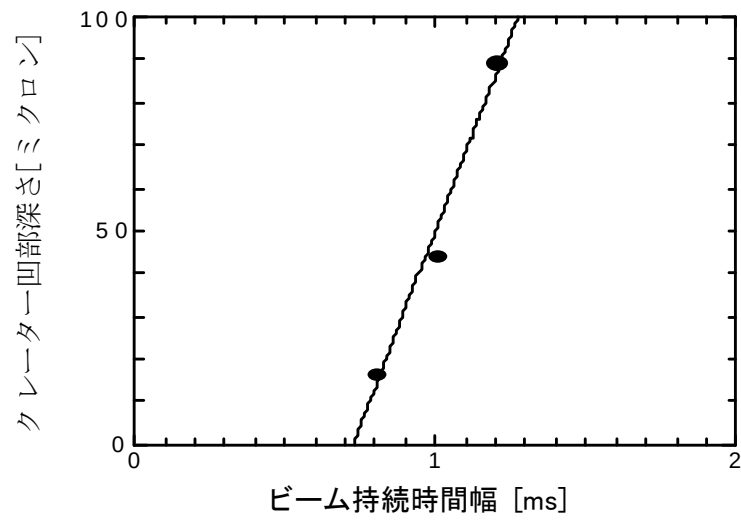
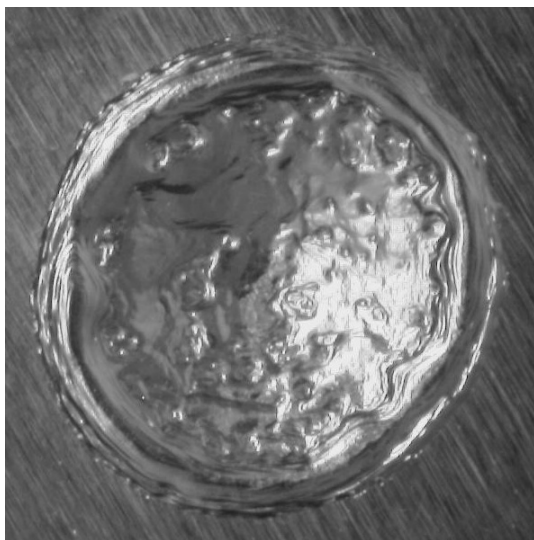
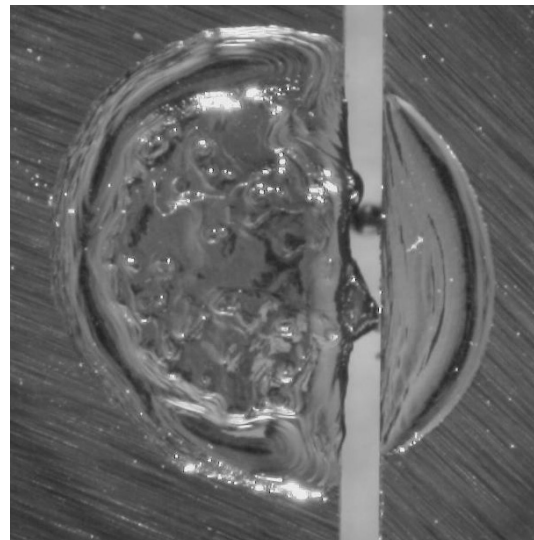


図2 損耗発生閾値付近の電子ビーム持続時間幅変化に伴うクレーターの凹部深さ変化



単一試料



突合せ試料

図3 照射後タングステンの表面写真

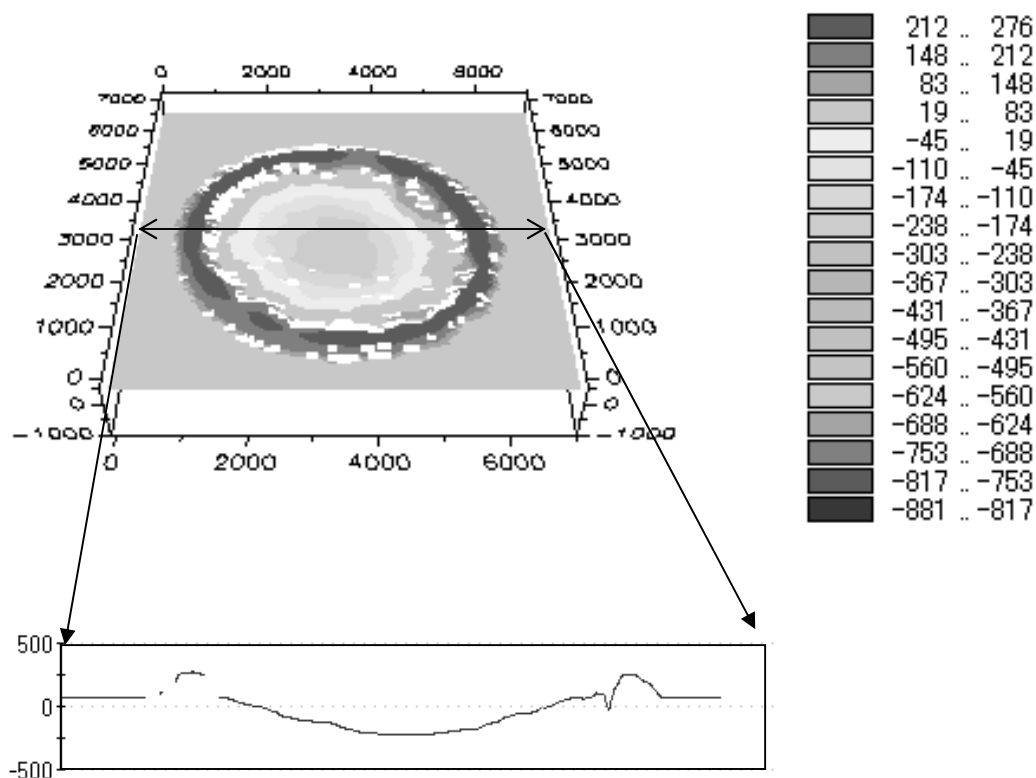


図4 長時間幅ビーム照射時に発生するWクレーターの形状測定例

4.4 まとめ

JEBIS 装置を用いて、ELM によるダイバータ損耗などを含む、異常熱入力に伴う諸材料表面損耗の模擬実験を実施した。電子ビーム高・熱負荷条件を種々に変化し、各種材料の損耗量（概略値）を得ることができた。損耗開始の閾値（電子ビーム入力条件）の推定が可能になり、その方法が、ELM を伴う MFE の領域に留まらず、IFE も含む、より広範囲の核融合炉壁相互作用の研究に応用可能であることを示した。

単一表面に加えて、突合せ境界部を有する試料表面の照射後表面詳細計測も行った。図2の損耗深さデータのフィッティングにより、ビーム持続期間幅の損耗閾値は 0.73ms となり、カーボンの場合の前頁数式中の 45 は、タングステンの場合に約 270（参考値）となった。すなわち、タングステンはカーボンに比べて、約 6 倍（参考値）大きな閾値を有することが判った。今後の計画としては、電子ビームの、より高い時間・空間分解照射再現性を実現し、試料表面の高速発光分析などを併用して、さらに精度の高い照射実験結果を出すことがある。また、群馬大学と応用ながれ研究所へ移設した関連実験装置の再稼動を、できるかぎり早期に実現し、電子ビーム、イオンビーム、レーザー光を用いた、より進化した炉壁応答関連研究を実施する。

本共同研究に関する成果リスト

- [1] Koh.Kasuya, S.Ozawa, T.Norimatsu, S.Nakai, S.Suzuki, K.Esato, M.Enoeda, M.Akiba, W.Mroz, T.Renk and M.Sato et al., “Summary of the plasma facing surface material ablations with high-flux pulsed particle beams, UV laser”, 5th IAEA Technical Meeting on “Physics and Technology of Inertial Fusion Energy” 24-26 March 2010 Vienna, Austria, (in print) (2010).
- [2] Koh.Kasuya, S.Ozawa, T.Norimatsu, S.Nakai, S.Suzuki, K.Esato, M.Enoeda, M.Akiba, W.Mroz, T.Renk and M.Sato, “Analyses of liquid wall responses against the high flux fusion products”, IAEA Research Coordinated Meeting of Coordinated Research Project on “Pathways to Energy from Inertial Fusion: an Integrated Approach”, 22-24 March 2010, IAEA's Headquarters in Vienna, Austria, (in print) (2010).
- [3] 糟谷紘一ほか、“標的爆縮に起因する慣性核融合炉壁からの放射とその標的注入スキームならびに炉システムに及ぼす影響”、平成21年度大阪大学レーザーエネルギー学研究センター共同研究報告書、平成22年3月。
- [4] K.Kasuya et al., “First Wall Ablations with High-Flux Pulsed Particle Beams, UV Laser Lights and X-rays for Nuclear Fusion Energy Reactor Design Base”, 2010 Eni Award (Recommended and Applied, no selection as final winner) (2009-2010).
- [5] K.Kasuya, S.Ozawa, S.Suzuki, K.Esato, M.Akiba, W.Mroz, A.Prokopiuk, M.Sato, K.Shimoda, T.Norimatsu, M.Nakai, K.Nagai, T.Ohshige, H.Furukawa, “Applications of Laser and Particle Beam Apparatuses to Fusion Reactor Plasma Facing Future Research Works”, Proceedings of 4th IAEA Technical Meeting on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers, Kobe, Japan, September 13, 2007, CD-ROM Distribution (2008).
- [6] 糟谷紘一ほか、“標的爆縮に起因する慣性核融合炉壁からの放射とその標的注入スキームならびに炉システムに及ぼす影響”、平成20年度双方向（核融合科学研究所・大阪大学レーザーエネルギー学研究センター）共同研究報告書、平成21年1月。
- [7] K.Kasuya, S.Ozawa, S.Suzuki, K.Esato and M.Akiba, “Material Surface Ablation with ELM-like E-Beam Thermal Load”, Proceedings of the 22nd IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, CD-ROM Distribution (2007).
- [8] K.Kasuya, S.Ozawa, S.Suzuki, K.Esato and M.Akiba, “Simulation Experiments for Divertor Ablation with ELM-like Electron Beams”, Japan-US Workshop on Heat Removal and Plasma Materials Interactions for Fusion, Fusion High Power Density Components and System, and IEA Workshop on Solid Surface Plasma Facing Components, Proceedings of the Japan-US Workshop on Heat Removal and Plasma Materials Interactions for Fusion, Fusion High Power Density Components and System, and IEA Workshop on Solid Surface Plasma Facing Components (2007).

5. マイクロ波ロケットの性能向上に向けた研究

研究代表者：小紫公也（東京大学大学院新領域創成科学研究科）

原子力機構担当者：坂本慶司

研究協力者（機構以外の協力者）：山口敏和（東京大学大学院新領域創成科学研究科）

研究期間：平成 19 年度-21 年度

5.1 研究目的・意義

現在世界で主力の打ち上げロケットは、ペイロード 1 キログラム当たり 85 万円かかる。この高コストの原因は、打ち上げ時に自重の 9 割にも及ぶ大量の燃料を抱えて飛び上がらなければならない点にある。その一方で、太陽発電衛星やスペースコロニーなどの大型宇宙施設の建設が計画されているが、これらの計画は打ち上げコストが現在の 10 分の 1 に下がらないと実現不可能と言われている。本研究では、マイクロ波ビームで遠隔に推進エネルギーを供給することで打ち上げ時の重量を劇的に減じ、打ち上げにかかるコストを現在の百分の一のオーダーまで下げることを目指している。

そこで我々が提案しているのが「マイクロ波ロケット」である。エネルギー源を機体に搭載する必要がなく、また大気中では空気を推進剤として用いるので、燃料をほとんど搭載する必要がなく、ビーム発振基地の建設が済めばコストはほぼ電気代のみとなる。打ち上げ回数が増えるほど一回あたりの打ち上げコストが低減できるシステムとして期待されており、世界各国の研究者がその性能を競っている。地上のビーム発振基地から照射される電磁波ビームを機体で受け、大気が急激に加熱されることにより生じる衝撃波を機体で受けて推進力を得るものであるが、ミリ波ビーム発振器として、現在国際熱核融合実験炉 (ITER) の加熱・電流駆動システムとして開発が進むメガワット級ジャイロトロンを利用しようという点に独創性があり、それゆえ技術的および経済的実現可能性が格段に高いのが特徴である。

本研究期間では、マイクロ波ロケットの高性能化（高推力化・高効率化）とともに、打ち上げに必要な大電力ミリ波の長距離ビーム伝送技術に関する研究を行った。

5.2 研究成果

5.2.1 マイクロ波ロケットの高性能化（高推力化・高効率化）と打ち上げデモンストレーション

振り子を利用した推力測定スタンドの開発を行った。従来の実験に比べ、推進器とビームとのアライメント修正などが不要で、効率的に測定を行うことが出来るようになった。この推力測定スタンドを利用し、ミリ波ビームのパワー密度と雰囲気圧力をパラメータとして、それぞれのパラメータに最適な推進機長を求めることに成功し、その最適条件下での推進性能（推力電力比）を求めたのが図 1 である。このマップにより、様々なビーム条件に対して最適な推進機長、あるいはパルス長さを与えることが可能となった。

また、繰り返しパルス照射下にて打ち上げのデモンストレーションを行い、約 120 グラムの推進機モデルを 1.2 メートルの高さまで持ち上げることに成功した。（図 2）このときの推力は約 2 ニュートンで、質量の大きな物体を持ち上げることのできるほどの力が出せることをわかりやすく示すことができた。

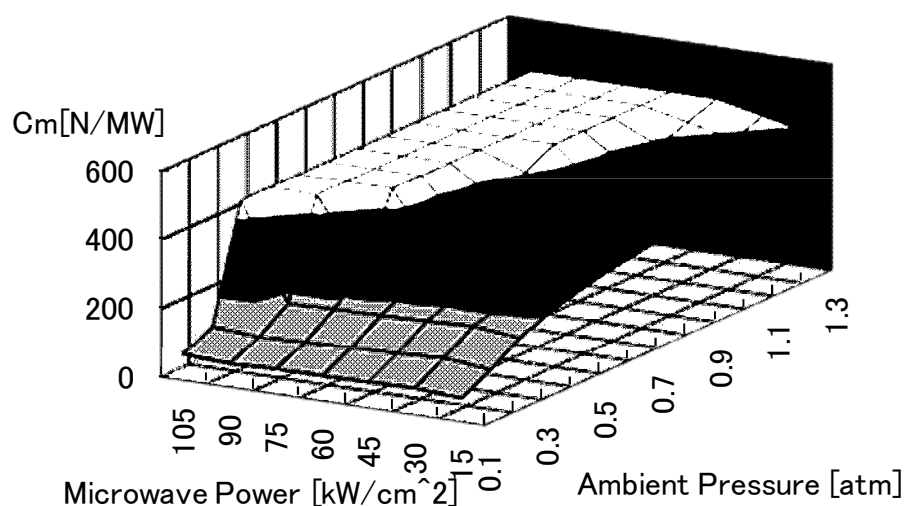


図1 推進性能マップ

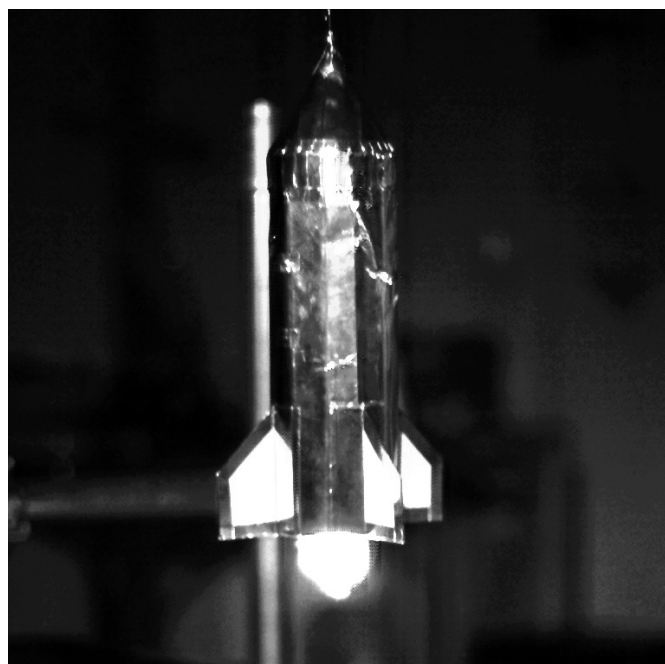


図2 打ち上げデモンストレーション

5.2.2 大電力ミリ波の長距離ビーム伝送技術に関する研究

マイクロ波ビームの長距離空間伝送技術の実証を行った。長距離伝送にはマイクロ波のビーム径を拡大する必要があるが、送電側でパラボラミラーを用いてビーム径を広げ、受電側で同じくミラー系を用いて元の径に戻してから推進力を得る実験を行い、5メートル以上離れた場所でも十分な推進力を発生し続けることができた。本技術は、将来の大電力無線エネルギー伝送の可能性を示唆するものでもある。

5.4 まとめ

- 1) 広いパラメータ領域で推力電力比 400N/MW が達成できることがわかった。その際に最適なマイクロ波パルス幅も算出することが可能である。
- 2) 約 120 グラムのロケットモデル(2003 年度のデモと比べて 10 倍の重さ)の打ち上げに成功した。
- 3) 10 メートルの平行ビーム空間伝送を可能にするミラー系を構築し、5 メートル以上離れたところでプラズマ着火、推進力の発生に成功した。

5.5 今後の予定

計算上は、現在のジャイロトロンを用いて1 キログラムのモデルを持ち上げることが可能である。この重さのモデルを5メートルから10メートルの高さに持ち上げるための推進器(特に吸気系)の改良と光学系の軽量化が課題である。

本共同研究に関する成果リスト

- [1] Y. Oda et al., Journal of Space Technology and Science, 22, 2(2007) 30-36.
- [2] Y. Oda et al., Journal of Propulsion and Power, Vol.25, No.1 (2009) 118-122.
- [3] Y. Oda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 116001.
- [4] Y. Oda, et al., 27th International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, Japan, 2009.7.5-12.
- [5] Y. Oda, et al., The 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Busan, Korea, 2009.9.21-25.
- [6] T. Yamaguchi, et al., 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Korea, 2009.10.12-16.
- [7] T. Yamaguchi, et al., 6th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Scottsdale, Arizona, U.S., 2009.11.1-5

付録 発表資料

A-1. 核融合プラズマ診断用人工ダイヤモンド放射線検出器の中性子応答関数測定

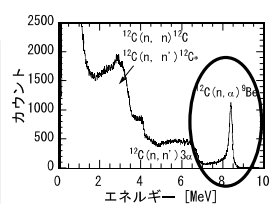
核融合プラズマ診断用人工ダイヤモンド 放射線検出器の中性子応答関数測定

研究代表者 北海道大学 金子純一 准教授
 機構担当者 核融合研究開発部門 佐藤 聡
 研究協力者 藤田文行(北大)、鹿田真一(産総研) 他

ダイヤモンド放射線検出器の特長と開発目標

ダイヤモンド検出器の特長

- 耐放射線性 (Siの3桁以上)
- 耐腐食性 (共有結合)
- 高温動作 (バンドギャップが5.47eV,共有結合)
- 応答速度 (移動度 μ_e :2000 cm/V・sec以上)
- 可視光不感 (バンドギャップが5.47eV)
- 14MeV中性子との $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反応

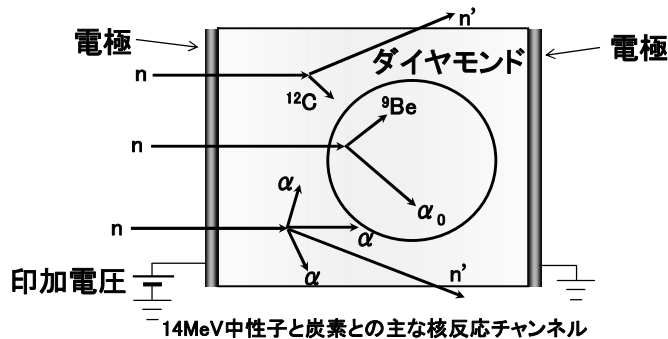


ロシア製天然ダイヤモンド
の14MeV中性子応答関
数測定例($\Delta E/E$:2.0%、検
出効率: 1×10^{-3} 以上)

開発目標

- $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反応を利用した、DT核融合炉におけるプラズマイオン測定用14MeV中性子スペクトロメータの開発
- 高温・高放射線環境下においてエネルギー分析可能な人工ダイヤモンド放射線検出器の開発

ダイヤモンド放射線検出器による14MeV中性子測定原理

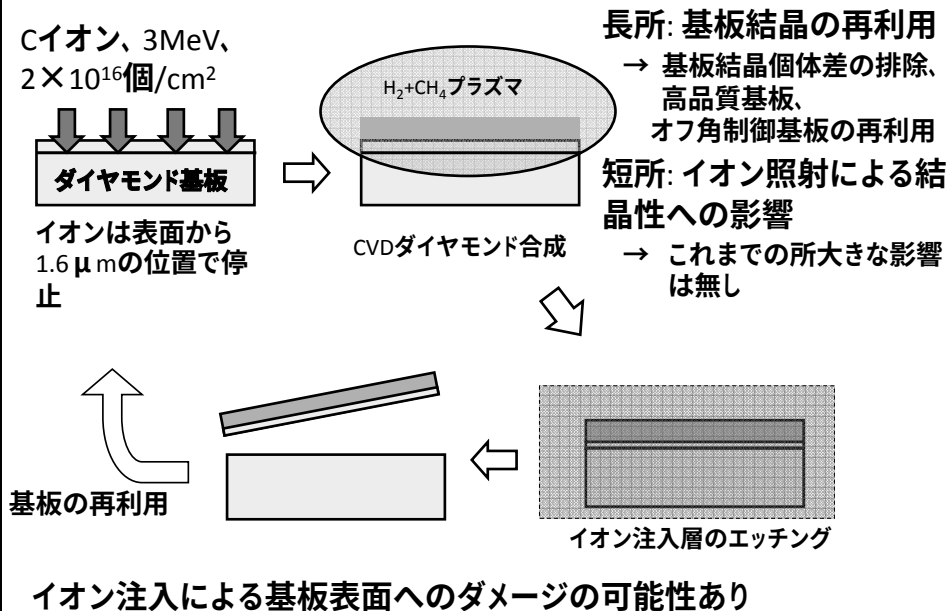


核反応の種類	反応断面積[mb]	生成荷電粒子エネルギーの総和[MeV]	閾値[MeV]
弾性散乱	800	0-4.00	0
非弾性散乱	200	0.04-3.29	4.8
$^{12}\text{C}(n, n'_1)3\alpha$	10 ± 2	0.49-3.28	8.3
$^{12}\text{C}(n, n'_2)3\alpha$	76 ± 8	2.57-4.86	10.4
$^{12}\text{C}(n, n'_3)3\alpha$	47 ± 4	3.83-5.76	11.7
$^{12}\text{C}(n, n'_4)3\alpha$	39 ± 12	4.94-6.46	12.8
$^{12}\text{C}(n, n'_5)3\alpha$	39 ± 12	6.11-7.17	13.8
$^{12}\text{C}(n, \alpha_0) {}^9\text{Be}$	72 ± 9	8.4	6.2

研究の目的

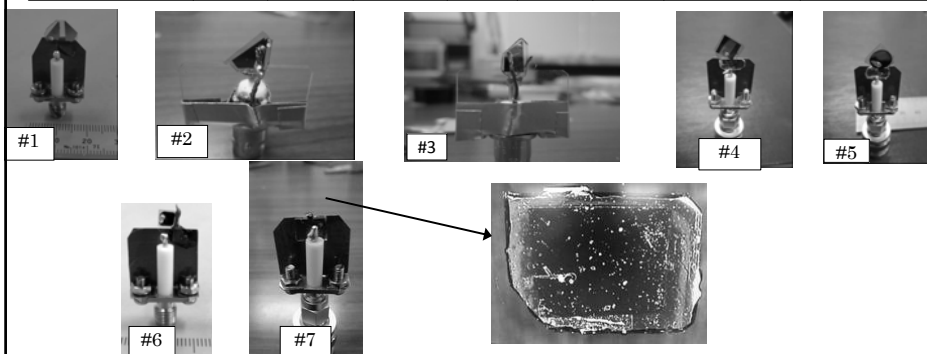
本研究では産業技術総合研究所ならびに北海道大学において合成した化学気相合成(CVD)ダイヤモンド単結晶から放射線検出器を製作し、14MeV中性子に対する応答関数測定をFNSにおいて行う。これにより、スペクトロメータとしての性能評価を行うと共に、結晶内における電荷捕獲等の評価を行う。

Lift-off法によるダイヤモンド自立膜の製作

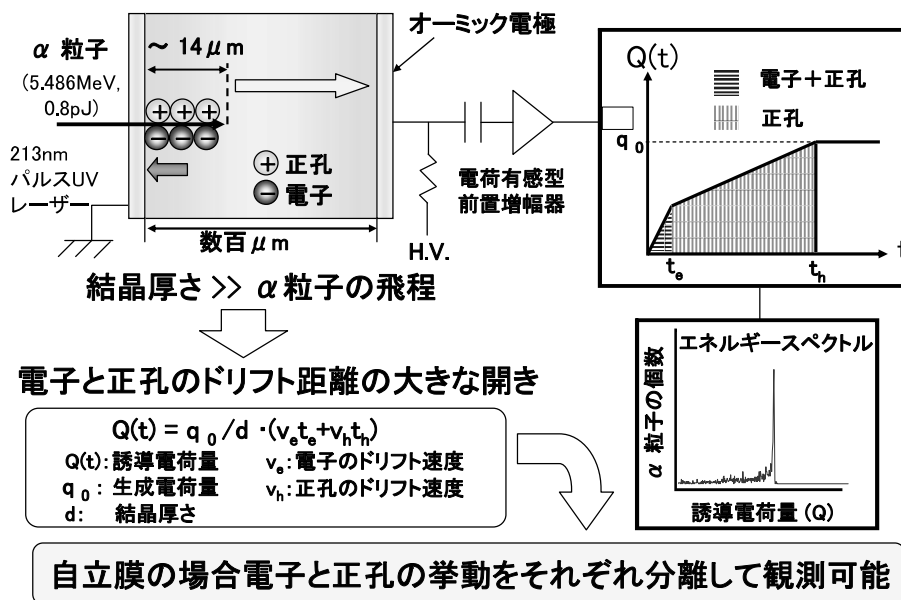


試作したダイヤモンド検出器

試料	膜厚 (mm)	CH ₄ /H ₂	基板温度 (°C)	圧力 (Torr)	Δ E/E (電子)	Δ E/E (正孔)	印加電圧/電界 (V)/(V/cm)	備考
#1 (AIST120823)	0.095	10%	900	160	4.4%	0.73%	200(21k)	同一基板使用
#2 (AIST290519)	0.08	10%	940	160	13%	1.0%	200(25k)	
#3 (AIST280730)	0.2	10%	940	160	15%	3.3%	100(5k)	
#4 (AIST290708)	0.1	10%	910	160	感度有	4.5%	40(4k)	
#5 (AIST290722)	0.4	10%	930	160	21.7%	13.2%	250(6.25k)	
#6 (E6単結晶)	0.5	—	—	—	2.83%	2.43%	200(4k)	エレメント6製
#7 (HU025)	0.08	10%	900	160	15.7%	6.7%	150(1.88k)	北大合成

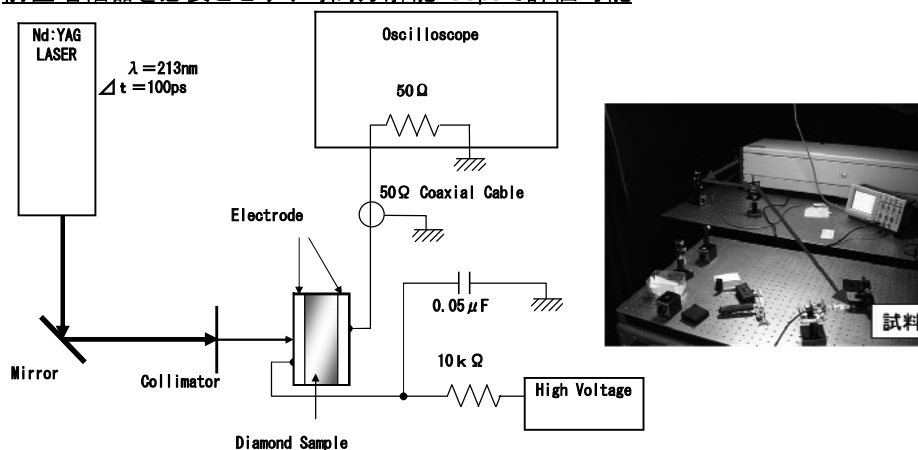


α線を用いたダイヤモンド結晶中の 電荷キャリア輸送特性評価



UVパルスレーザーを用いた電荷キャリア輸送特性評価

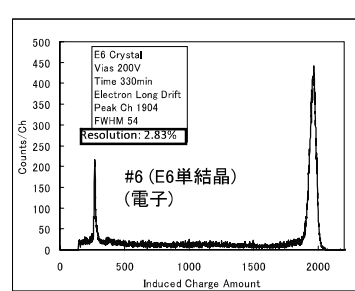
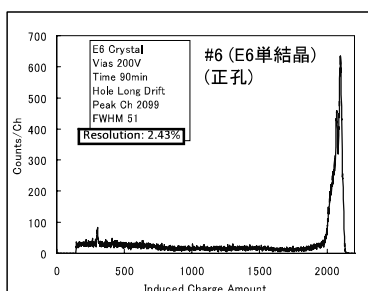
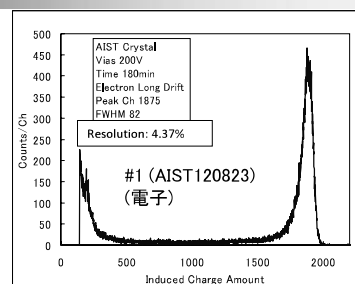
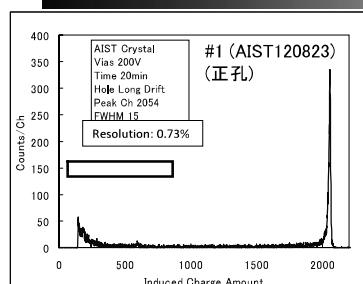
前置増幅器を必要とせず、時間分解能150psで評価可能



- ・UVパルスレーザー、 $\lambda = 213 \text{ nm}$ 、 $\Delta t = 100 \text{ ps}$ 、出力: 20 mJ
- ・オシロスコープ、アナログ帯域: 5 GHz

UVパルスレーザーToF測定体系
(測定システムの時間分解能: 150~200 ps)

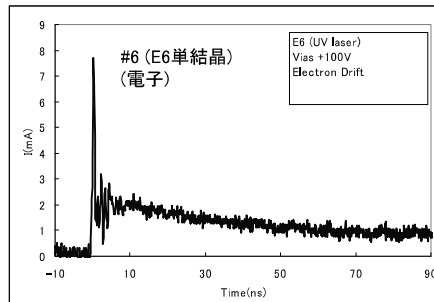
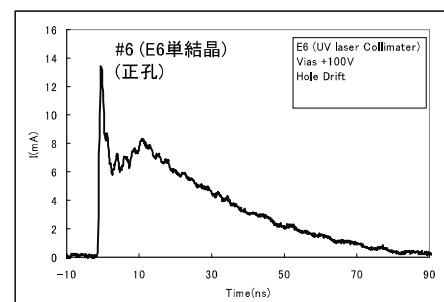
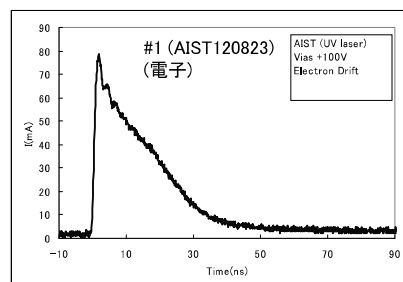
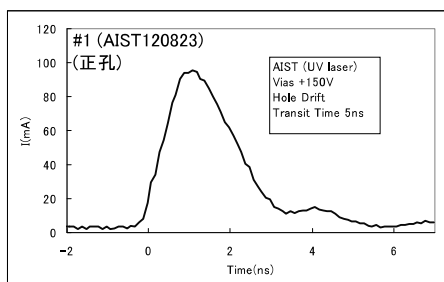
α 線に対する誘導電荷量分布測定例



(c)

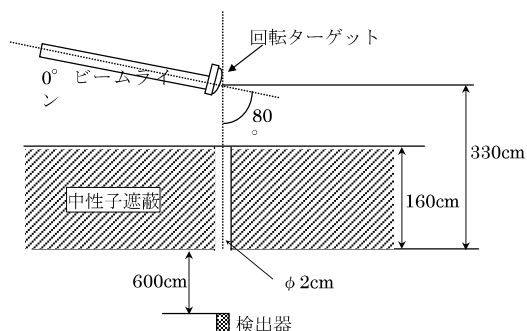
(d)

ToF法による電荷キャリア輸送特性測定例



14MeV中性子応答関数測定実験

産総研製CVD単結晶(#1)、エレメントシックス(#6)製CVD単結晶と多結晶、D-Rad製天然ダイヤモンドの α 線と14MeV中性子応答関数測定を行った。

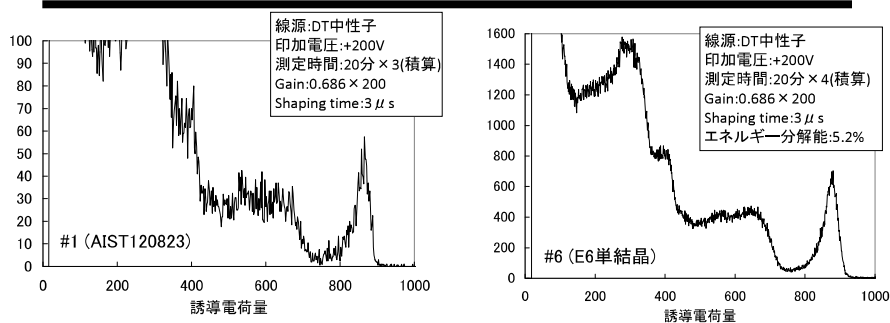


FNS 0度ビームラインの実験体系



実験体系の写真(実際の測定では検出器は電磁シールド中)

14MeV中性子応答関数測定例



- #1(AIST 120823)、#6(E6)ともに $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反応によるピークを観測
- #6(E6)は厚さが厚いため高い検出効率を持つが、印加電圧は200Vどまり
- 共に $\Delta E/E = 2\%$ 、検出効率: 1×10^{-3} counts/unit fluxには届かず

メタン濃度:10%と高品質ダイヤモンド合成の常識から外れた合成条件でもエネルギー spektrometa グレードの検出器が実現。
再現性については確認が必要

まとめと今後の予定

- H20年度に行った実験により、半導体デバイス用にメタン濃度10%で高速合成し、Lift-off法によって自立膜化したCVDダイヤモンド単結晶から14MeV中性子に対して4%台のエネルギー分解能を持つ検出器を製作可能であることが明らかとなった。
- H21年度に行った合成条件の探査の結果、試料#1と同一基板を使用し、160Torr、900度の合成条件で良い結果が出ていることが分かった。H21年度のFNS実験はターゲットの問題が発生し行っていない。

現在、北海道大学ではLift-off法と高品質基板を使用した結晶合成を進めており、これによりエネルギー分解能を劣化させている電子に対する電荷捕獲を低減し、検出器性能の向上をはかる。合成条件を北大と同一のプラズマCVD合成装置を使用しているA産総研にフィードバックし、1cm²台の大型検出器の実現も併せて目指す。

成果発表

- (1) K.Sato, J.H.Kaneko et al., "Evaluation of CVD diamonds for a DT neutron energy spectrometer", ICFRM-14, 2009年9月札幌
- (2) 佐藤、垣本 他, "高速合成CVD単結晶ダイヤモンドによる14MeV中性子応答関数測定", 原子力学会・秋の大会、2009年9月仙台

この他、14MeV中性子応答関数測定に関して査読付き論文の投稿を準備中。

A-2. 機能性セラミックスに対する核融合中性子の動的照射効果

平成22年7月16日

「施設利用型共同研究平成21年度終了テーマ成果報告」
日本原子力研究開発機構東京事務所 第1会議室（新生銀行ビル12階）

機能性セラミックスに対する核融合中性子の動的照射効果

研究代表者 東北大・金研 四竈 樹男、永田 晋二、土屋 文

機構担当者 核融合中性子工学研究G 今野 力、大西 世紀

背景

- ◆ SiC/SiC複合材料は、核融合実用炉ブランケットおよび冷却媒体（水、Heガス、熔融鉛、液体Li）間の絶縁材料として期待されている。
- ◆ 放射線照射環境下に曝されたSiC/SiC複合材料の電気、熱および機械的特性の変化、すなわち各特性の照射損傷による影響について調べることは、核融合炉ブランケット設計において極めて重要である。

● 研究目的・意義

- ◆ 核融合炉では、機能性セラミックスが重要な働きをされると考えられる。セラミックスには優れた光学・電気的特性を有する材料が存在するが、放射線照射下においては照射誘起伝送損失や照射誘起起電力といったそれぞれの特性に対する照射効果が存在する。本研究は、これらの現象を正確に把握するとともに、実用化への指標を得ることを目的とする。

研究成果(全研究期間中)

■ 実験

- 作製したその場電気伝導度測定用試験片ホルダーを用いて、日本原子力研究開発機構東海研究開発センターの高速中性子源利用施設(FNS)に設置された高速中性子発生装置にCVD法により作製された高純度のSiC試料(CVD-SiC)を配置した。14 MeVの高速中性子を室温において照射しながらその場で±100 Vの直流電圧を印加して直流電流値を測定した。得られたデータに試料体積を考慮して照射誘起伝導度を求め、高速中性子照射されたCVD-SiCの電気特性に対する動的照射効果について調べた。

試験片ホルダー



CVD-SiC試料
(φ8x1t mm³)



高速中性子源

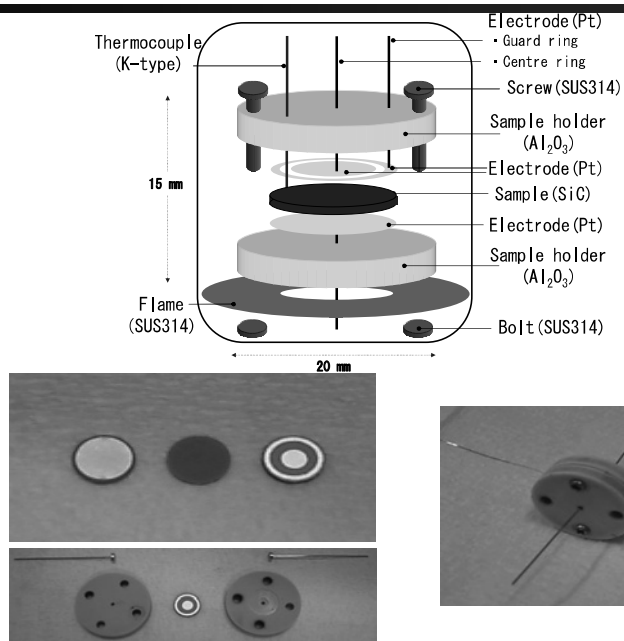
CVD-SiCセラミックス試料 *T. Nozawa (JAEA)

	CVD-SiC						
複合材マトリックスでの分類	高純度						
外観							
製造条件	Rohm&Haas社製 CVD 純度：99.9995%						
密度 [g/cm ³] (相対密度)	3.21						
曲げ強度 [MPa]	415						
弾性定数 [GPa]	460						
ポアソン比	0.21						
熱膨張率 [10 ⁻⁶ /°C] (RT~1400°C)	4.45						
熱伝導率 [W/mK] (室温)	285-300						

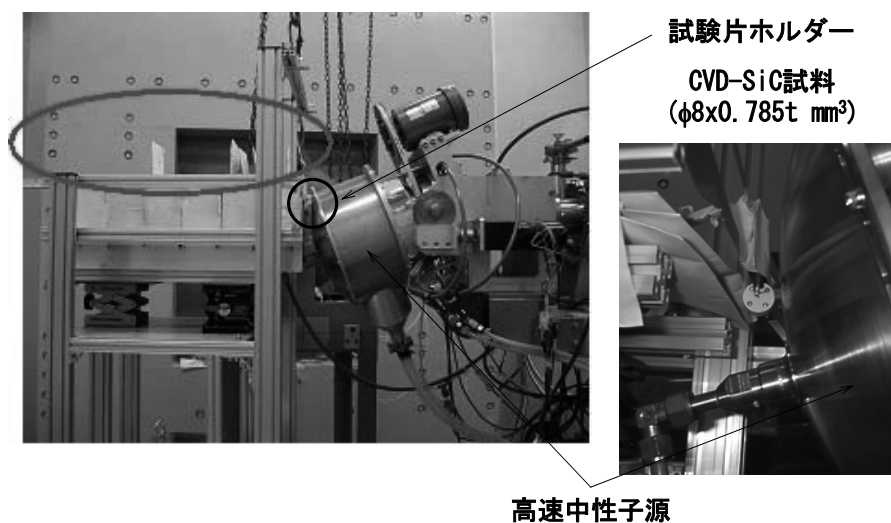
材料名	材質	C	O	N	B
CVD	SiC	30.5%	0.007%	0.008%	< 1
Na	Mg	Al	P	S	K
6	1	< 1	< 1	< 1	3
Ca	Ti	V	Cr	Fe	Co
1	< 1	< 1	1	5	3
Ni	Cu	Ga	Y	Zr	Ag
< 1	1	1	< 1	< 1	< 1
Ta	In	Si	単位：%表示がない 分析値はmass ppm		
56	130	BaI			

分析方法：	
C：燃焼赤外吸収法、N：加熱融解熱伝導度法、 O：加熱融解赤外線吸収法、その他：GD-MS法	

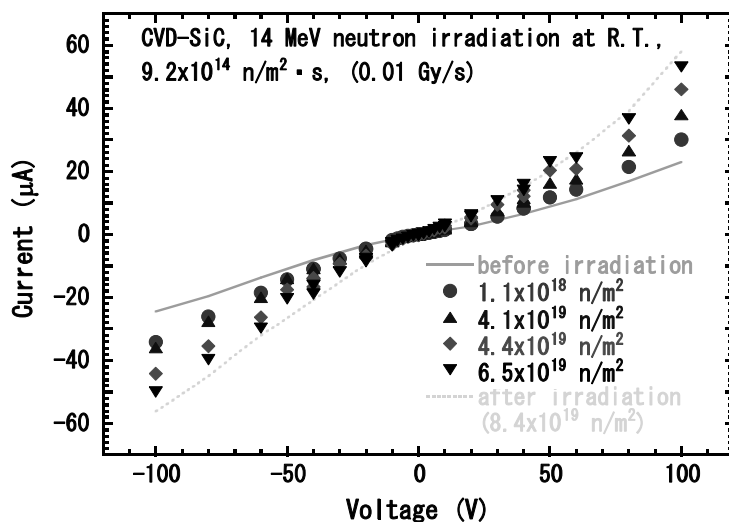
放射線照射その場電気(イオン)伝導度測定用試験片ホルダー



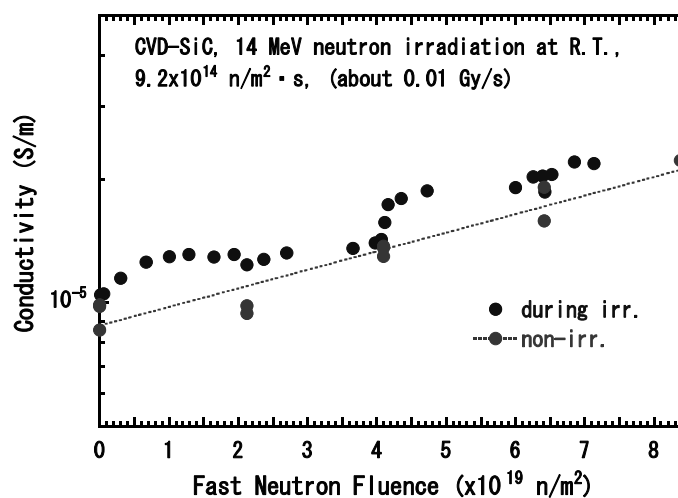
シリコン炭化物(CVD-SiC)の14 MeV 高速中性子照射実験 (日本原子力研究開発機構東海研究開発センターの高速中性子源利用施設(FNS))



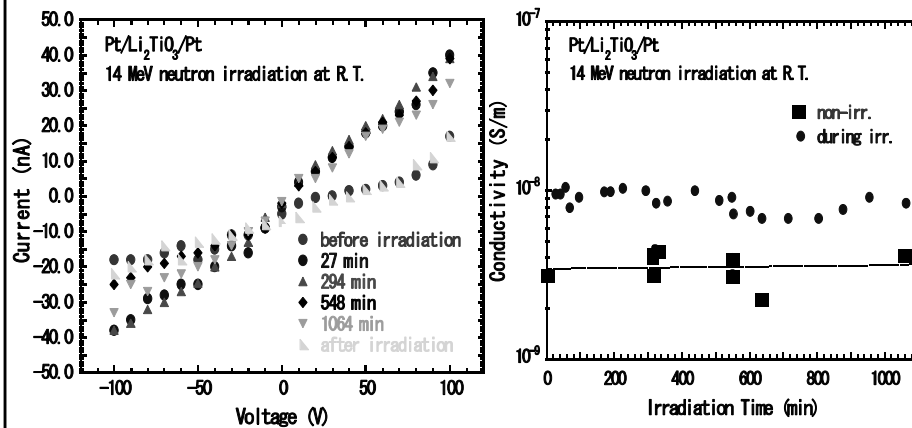
14 MeV高速中性子照射下におけるシリコン炭化物 の照射誘起伝導度 (V-I特性)



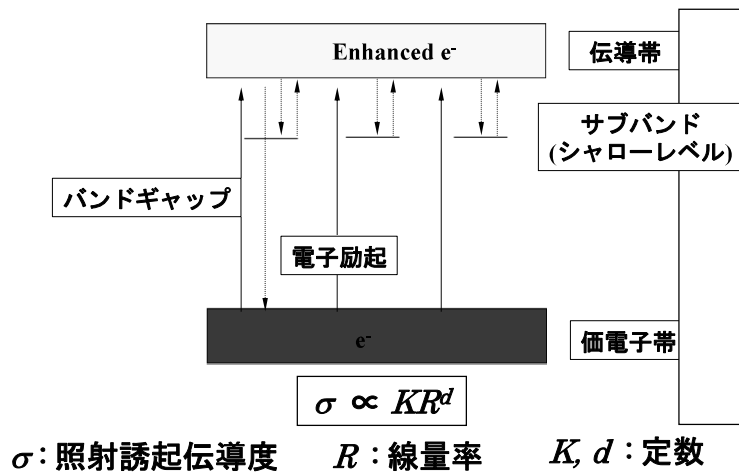
14 MeV高速中性子照射下におけるシリコン炭化物の照射誘起 伝導度 (高速中性子照射量依存性)



機能性セラミックスに対する核融合中性子の動的照射効果



照射誘起電子伝導のメカニズム



まとめ

- ➡ 照射誘起電気伝導度測定が可能な照射下その場測定用試験片ホルダーおよびキャプセルの作製、照射実験装置の整備を実施した。
- ➡ この照射下その場計測手法を用いて、CVD-SiCの電気伝導度が室温および14 MeVの高速中性子照射下において測定された。その結果、照射誘起伝導度が低高速中性子照射量においても観測されることが判明された。
- ➡ また、中性子のカスケード弾性衝突による照射損傷(照射誘起絶縁劣化現象)が生じていることがわかった。

今後の課題・予定

- ➡ 動的照射誘起効果のヘリウムおよび水素等の雰囲気に対する影響、温度依存性、照射量依存性および照射束依存性について調べる。
- ➡ 紫外・可視・赤外の各波長領域における光吸収、光電子分光法による電子状態、X線回折による構造解析等を行い、動的照射誘起効果および照射誘起欠陥形成のメカニズムについて調べる。

A-3. 核融合中性子照射下における疲労試験とその内部組織観察

核融合中性子照射下における疲労試験と その内部組織観察

京都大学原子炉実験所
義家敏正、佐藤紘一、徐虫レ

日本原子力研究開発機構
今野力 沓掛忠三、落合謙太郎

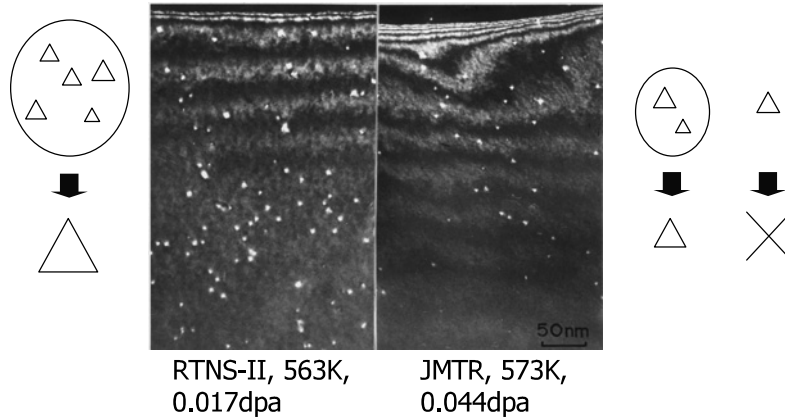
研究目的

核融合炉の第一壁や発電用原子炉の圧力容器等の材料には起動、停止による温度変動により熱応力が発生し疲労する。同時に中性子で照射されるため、照射下で疲労が起きている。



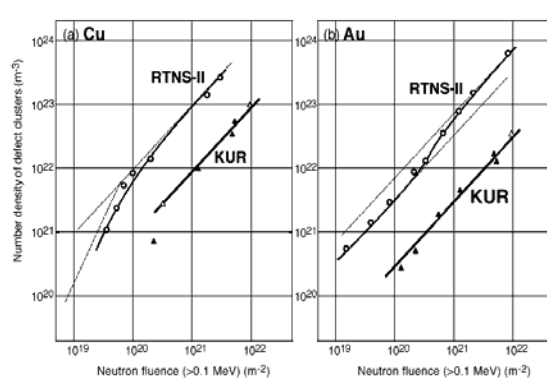
- ・核融合中性子照射効果と核分裂中性子照射効果を陽電子消滅寿命測定の結果から比較し、その相関則を求める。
- ・照射下疲労試験を行った試料と、負荷を掛けない状態で照射した試料の内部組織を陽電子消滅寿命測定及び電子顕微鏡観察によって比較することにより、照射下疲労の欠陥形成機構を解明することを目的とする。

核融合中性子と核分裂中性子の 損傷組織の違い



核融合中性子と核分裂中性子を照射したAuの損傷組織

核融合中性子と核分裂中性子の 損傷組織の違い



(a)銅と(b)金の欠陥集合体の数密度の変化 [東北大 佐藤ら]

実験方法(中性子スペクトル比較実験)

試料

V-4Cr-4Ti (heat 2), F82H (核融合炉候補材料)

照射

核融合中性子照射… 日本原子力研究所の14MeV核融合中性子源FNS

核分裂中性子照射… 京都大学原子炉実験所の5MW研究用原子炉(KUR)

照射温度

室温、673K

KUR室温照射は水圧輸送管(Hyd)、

KUR673K照射は精密制御照射管(SSS)

照射後試験

陽電子消滅寿命測定法

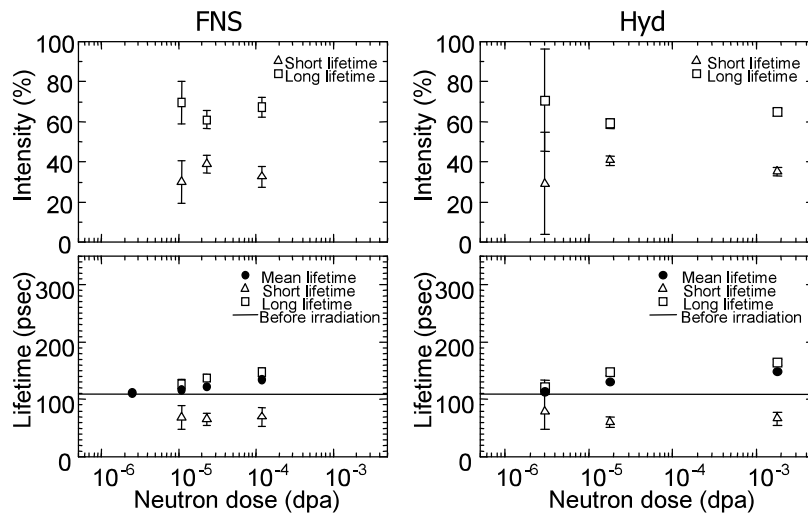
損傷量

損傷量 (dpa) (弾き出ししきいエネルギー V: 24 eV、Fe: 24 eV)

Facility	Irradiation temperature	Neutron fluence, $\phi/\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}$	Total dose (dpa)	
			V-4Cr-4Ti	F82H
FNS	RT	2.63×10^{16}	1.19×10^{-4}	7.64×10^{-5}
		5.13×10^{15}	2.32×10^{-5}	1.49×10^{-5}
		2.41×10^{15}	1.09×10^{-5}	7.00×10^{-6}
		5.59×10^{14}	2.52×10^{-6}	1.63×10^{-6}
	673K	2.24×10^{16}	1.01×10^{-4}	6.51×10^{-5}
		4.73×10^{15}	2.13×10^{-5}	1.37×10^{-5}
3.49×10^{14}		1.58×10^{-6}	1.01×10^{-6}	
Hyd.	RT	8.05×10^{18}	2.26×10^{-3}	1.08×10^{-3}
		1.14×10^{17}	3.20×10^{-5}	1.53×10^{-5}
		2.06×10^{16}	5.77×10^{-6}	2.76×10^{-6}
SSS	673K	6.38×10^{17}	3.24×10^{-4}	1.57×10^{-4}

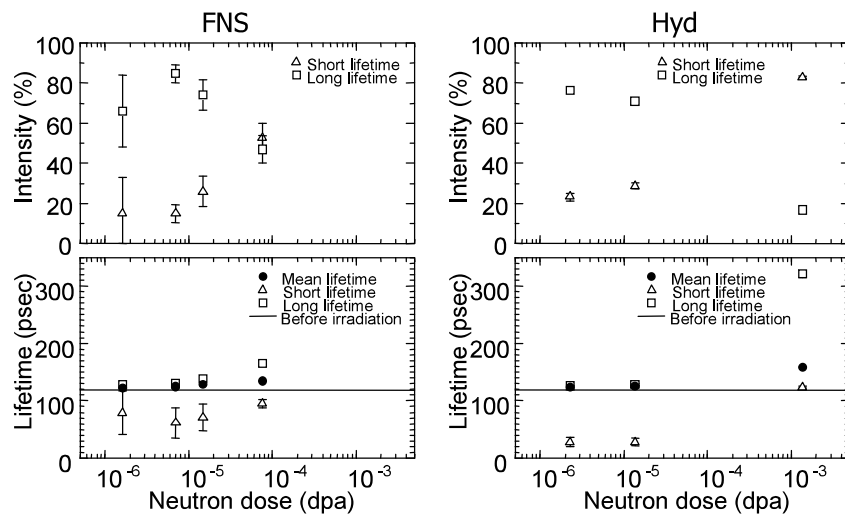
陽電子消滅寿命測定結果 1

V-4Cr-4Ti, 室温照射



陽電子消滅寿命測定結果 2

F82H, 室温照射

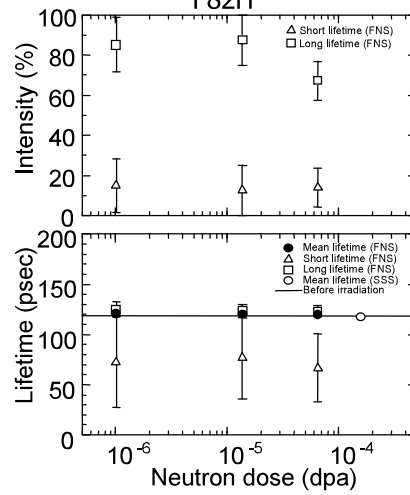
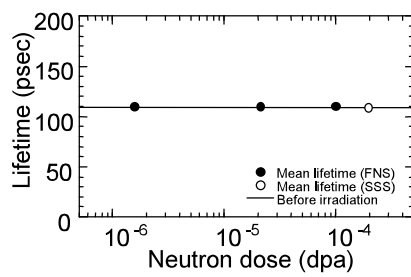


陽電子消滅寿命測定結果 3

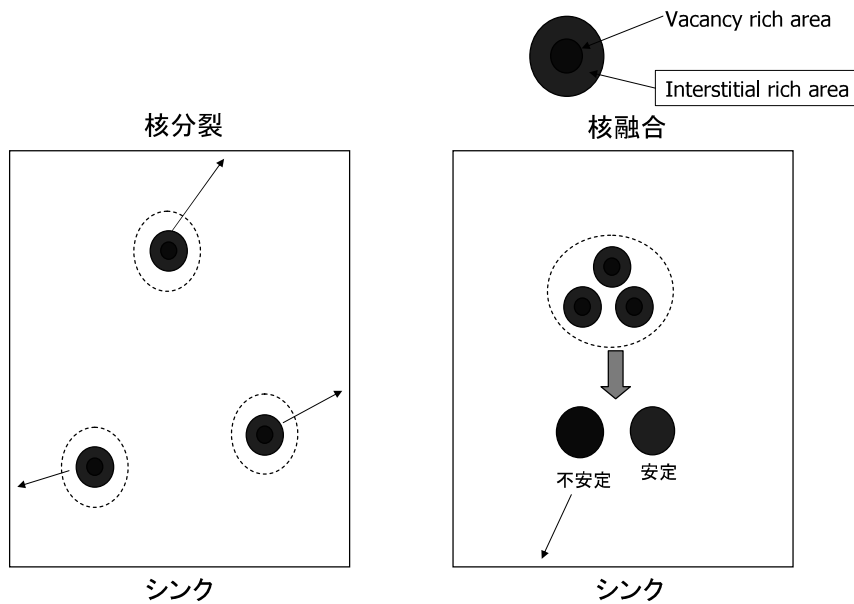
673K照射

V-4Cr-4Ti

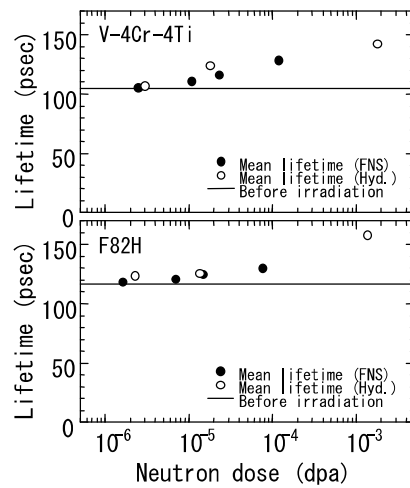
F82H



673Kにおける欠陥生成



室温照射の平均寿命

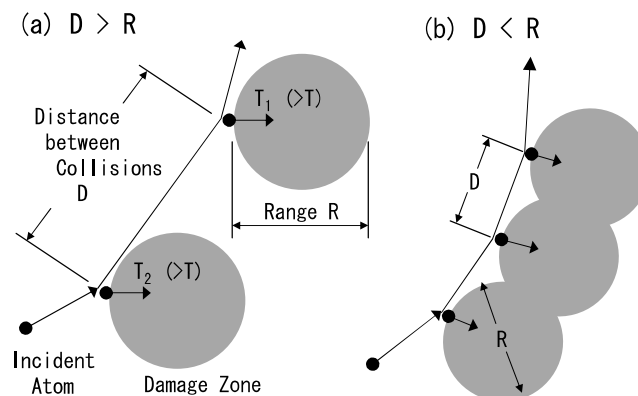


考察

サブカスケードエネルギー

Fe: 10 keV

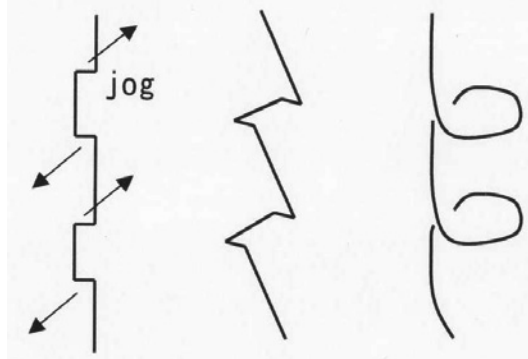
V: 5 keV



ヘリカル転位の成長

ジョグをもたせぬ転位

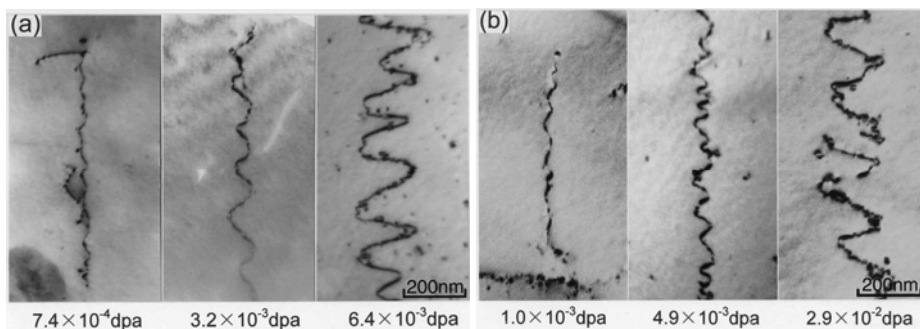
ヘリカル転位



Jog of screw dislocation is edge dislocation

→ Easy absorption of interstitials

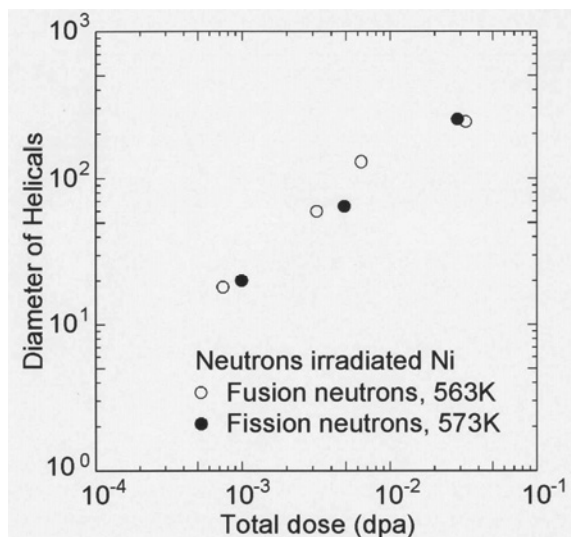
Niにおけるヘリカル転位の成長



Fusion neutrons at 563K

Fission neutrons at 573K

ヘリカル転位の成長のdpa依存



No effect of
cascade size on
free defects?

サブカスケードエネルギー解析

The calculation of the number of subcascades

$$N_{SC} = \int n_{SC}(E_R) \frac{d\sigma(E_R)}{dE_R} dE_R$$

$$n_{SC}(E_R) = 0$$

$$= 1$$

$$= \frac{E_D(E_R)}{2E_{SC}}$$

$$E_D(E_R) < E_{SC}$$

$$E_{SC} \leq E_D(E_R) < 2E_{SC}$$

$$2E_{SC} \leq E_D(E_R).$$

E_D : the damage energy

E_{SC} : the threshold energy for subcascade formation

1dpa当たりのサブカスケードの数

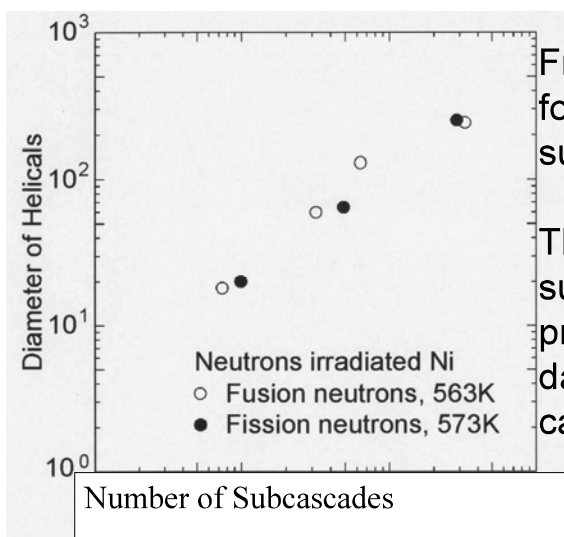
Threshold energy for subcascade formation (keV)	The number of subcascades (1/dpa)	
	Fusion neutrons	Fission neutrons
1	3.0×10^{-2}	2.9×10^{-2}
10	3.0×10^{-3}	2.6×10^{-3}
20	1.5×10^{-3}	1.2×10^{-3}
50	5.8×10^{-4}	3.4×10^{-4}
100	2.8×10^{-4}	1.1×10^{-5}
500	2.9×10^{-5}	9.7×10^{-7}

The number of subcascade is proportional to dpa if the subcascade energy is lower than 20keV.

Our calculation shows that the subcascade energy of Ni is 10keV. (J. Nucl. Mater. 179-181 (1991) 901)

The concentration of freely migrating defects is proportional to the number of subcascades.

ヘリカル転位の損傷量(dpa)依存



Free defects are formed in each subcascades.

The number of subcascades is proportional to the total damage (dpa) in the case of Ni.

VとFeの場合の1dpa当たりのサブカスケード数

$$\begin{aligned}
 N_{SC}(E_{PKA}) &= 0 & T(E_{PKA}) < E_{SC} \\
 &= 1 & E_{SC} \leq T(E_{PKA}) \leq 2E_{SC} \\
 &= \frac{T(E_{PKA})}{2E_{SC}} & 2E_{SC} < T(E_{PKA})
 \end{aligned}$$

1dpa当たりのサブカスケード生成数

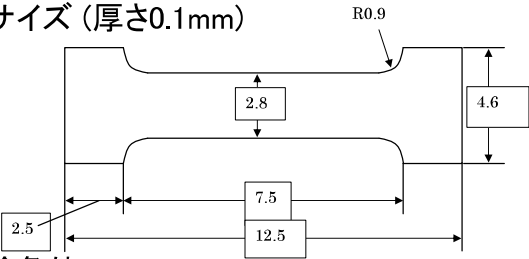
	Fusion neutron	Fission (SSS)	Fission (Hyd.)
V	4.79×10^{-3}	4.52×10^{-3}	4.52×10^{-3}
Fe	2.39×10^{-3}	2.23×10^{-3}	2.23×10^{-3}

生成するサブカスケード数はFissionとFusionで変わらない



低照射領域では欠陥量はサブカスケードの数に依存する

実験方法(照射下疲労実験)

- 純Ni (99.99%, Johnson-Matthey社製)
(1173K, 1時間歪取り焼鈍)
- 試料のサイズ (厚さ0.1mm)
 
- 疲労試験条件
初期引張歪: 0.1%以下、繰返歪み: 0.05%
- 中性子照射
FNS 室温にて一週間 (損傷量 1.5×10^{-4} dpa)
- 照射後試験
陽電子消滅寿命測定、透過型電子顕微鏡観察

陽電子消滅寿命測定の結果

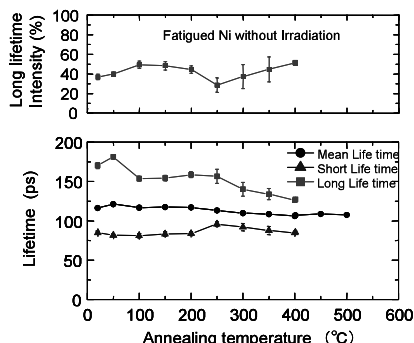


図1 照射なしで1C/sの周期で室温において疲労試験を行った試料の陽電子消滅寿命2成分解析の結果。

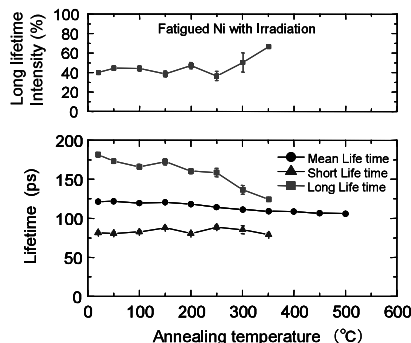
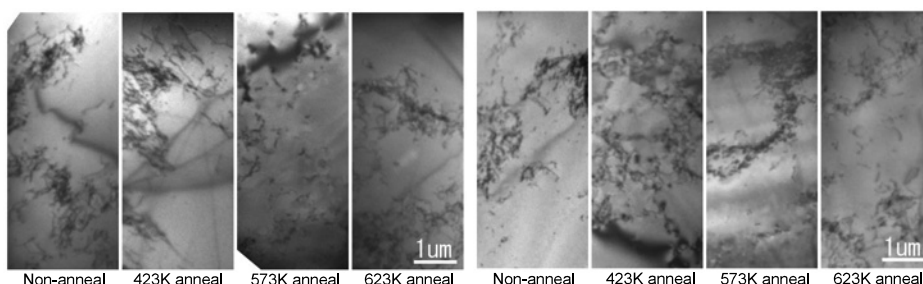


図2 FNSを用いた14MeVの核融合中性子照射下で、1C/sの周期で室温において疲労試験を行った試料の陽電子消滅寿命の2成分解析の結果。

- ・焼鈍挙動には点欠陥構造に違いが見られた。
- ・照射下疲労された試料には単空孔が250°Cまで残った。
- ・同程度の照射量で疲労の有無の影響を調べたところ、照射下疲労の方が点欠陥の形成が抑制された。(疲労により導入された転位のためと考えられる)

電子顕微鏡観察の結果



室温で14MeVの核融合中性子照射しながら1サイクル/sの周期で繰返荷重を与えた時の転位組織の焼鈍挙動

未照射下で1サイクル/sの周期で繰返荷重を与えた時の転位組織の焼鈍挙動

- ・セル組織の形成が見られた。
- ・焼鈍に伴う転位組織の大きな変化は見られなかった。
- ・微小な原子空孔集合体(積層欠陥四面体など)を捉えることはできなかった。

まとめ

- 673K照射ではいずれの試料も欠陥量は少なかった。高温のため、欠陥が移動し、シンクで消滅しやすく、また、欠陥集合体が不安定であるためと考えられる。また、核融合中性子照射の場合、転位が形成されていた。これはカスケードサイズの効果である。
- 室温照射では、核融合中性子照射と核分裂中性子照射でほぼ欠陥量は同じであった。低照射領域では生成したサブカスケードの数に比例して、欠陥が生成していると考えられる。
- 陽電子消滅寿命測定の結果から、照射下疲労では非照射下での疲労に比べて単空孔が高温まで残った。同照射量で疲労の有無の影響を調べたところ、疲労下の方が点欠陥集合体の形成が抑制された。ある程度までなら導入される転位は点欠陥のシンクとして働き、良い影響を与える。
- 電子顕微鏡観察の結果から、疲労により転位のセル組織が形成された。焼鈍による転位のセル構造は変化することはなかった。また、積層欠陥四面体などの微小な原子空孔集合体も観察することができなかった。

今後の予定

KURでの照射下疲労との比較と核融合炉候補材料での照射下疲労について調べる。また、KURの運転が再開したため、照射下疲労組織に与える中性子スペクトルの違いについても調べる。

成果発表

- (1) 佐藤紘一、井上和也、義家敏正、徐虬、若井栄一、沓掛忠三、落合謙太郎「核融合中性子と核分裂中性子を照射した金属材料の損傷構造の比較」第24回プラズマ・核融合学会、2007年11月27日
- (2) K. Sato, K. Inoue, T. Yoshiie, Q. Xu, E. Wakai, C. Kutsukake, K. Ochiai, 13th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2007年12月11日
- (3) K. Sato, K. Inoue, T. Yoshiie, Q. Xu, E. Wakai, C. Kutsukake, K. Ochiai, J. Nucl. Mater. 386-388 (2009) 203.

A-4. ELMとダイバータ関連ビーム照射による材料挙動の解明

平成21年度日本原子力開発機構・施設利用共同研究成果報告会（平成22年7月16日・日本原子力開発機構東京事務所会議室）

研究課題：**ELMとダイバータ関連ビーム照射による
材料挙動の解明**

研究代表者：**糟谷紘一**（レーザー総研・応用ながれ研）

原子力機構担当者：**鈴木 哲、江里幸一郎、榎枝幹男、秋場真人**
（ブランケット研究グループほか）

研究協力者（機構以外の協力者）：小澤 翔（東工大、東芝）、
中井貞雄、乗松孝好（阪大）、
井澤靖和、古河裕之、島田義則（レーザー総研）、
佐藤守彦（群大）、田邊哲朗（九大）、石原和仁（コムス）

研究期間：平成18年度～21年度

使用施設：電子ビーム加熱実験装置（JEBIS）

研究報告の概要

本研究に到る経緯

研究目的・意義

研究方法

研究成果

第1グループ

第2グループ

第3グループ

まとめ

***Keywords- ITER; diverter; ELM; ablation; electron beam
thermal load, surface profile change***

本研究に到る経緯

高エネルギー密度入射による炉壁の損耗：異なる損耗機構・特徴

現有装置による従来の研究：当初は慣性核融合研究向け

- (1) イオンビームによる照射：100ns, 0.1 MJ/m² 程度まで、
単一照射による表面損耗量の比較
- (2) レーザービームによる照射：10ns, 0.5 MJ/m² 程度まで、
多重照射による表面損耗量の変化

本研究の狙い：

よりエネルギー密度の高い照射：1ms, 1 MJ/m² 程度、
より広範囲の研究向け、核融合（磁場・慣性）分野全般向け、
特徴的なのは、ELM発生時のプラズマ対向壁の損耗研究、
将来的には、JT60-SA, ITER, DEMOにつながるデータ取得。

研究目的・意義：

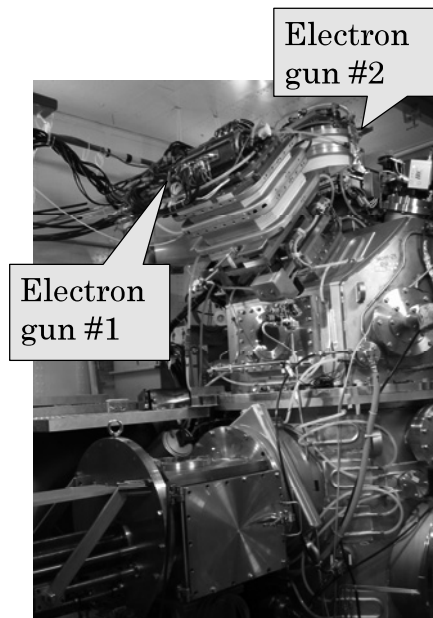
本研究は、那珂研究所電子ビーム装置により、ダイバータ候補材料照射を行い、ELMによるダイバータ表面の損傷など、ダイバータ開発に必須の関連諸データを蓄積することを目的とした。

より将来的には、イオンビーム装置やレーザー装置を用いて、同一サンプルへの重複照射を実施し、JT60 (BA), ITER, 原型炉の関連比較研究を実施したい。

研究方法:

使用装置:

1. 電子ビーム照射装置、
2. 表面形状測定装置



Photograph of Experimental Setup

Thermal load on the surface :

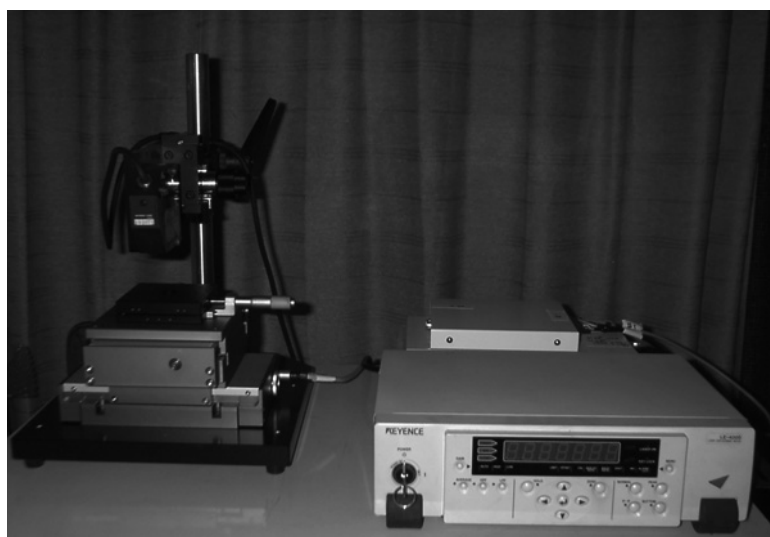
under the E-beam condition of 65kV and 2.28A,
with 3 different beam duration times of

1.0 ms : 1100 ~ 1200 MW/m²

1.2 ms : 1400 ~ 1450 MW/m²

1.5 ms : 1460 MW/m².

In the case of short duration time, the effect of different
acceleration voltage rise time changes the value of thermal
loads. The longer the duration time is, the smaller the rise time
effect becomes.



2次元表面形状計測装置・駆動部
(左)試料台 (右)コントローラ

Irradiated Sample Materials,

- a) Carbon
- b) Graphite
- c) Tungsten
- d) CFC (Carbon Fiber Composite)

Sample Target Structure,

- a) Simple, Plane, 2-D Structure
- b) 3-D Structure with Combined Double Samples, with Complex Boundaries and Sharp Edge Corners
- c) Single Structure with Gradual Slope Boundary

第1グループの試料照射:

タングステン試料損耗発生照射閾値の積極的推算

従来のカーボン報告値との比較

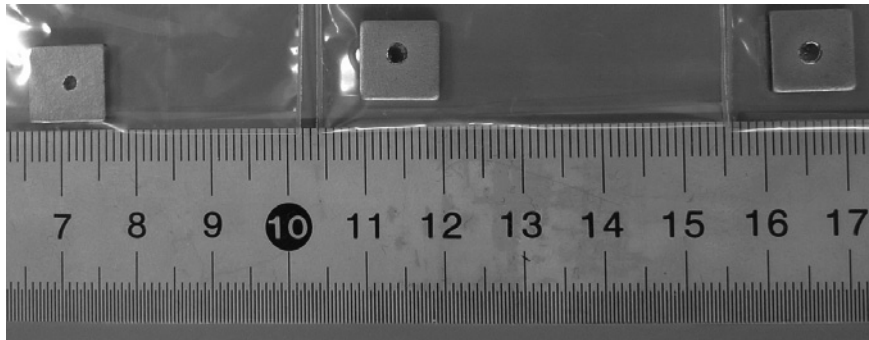
ビーム電圧 65kV, ビーム電流 2.3A

照射時間幅

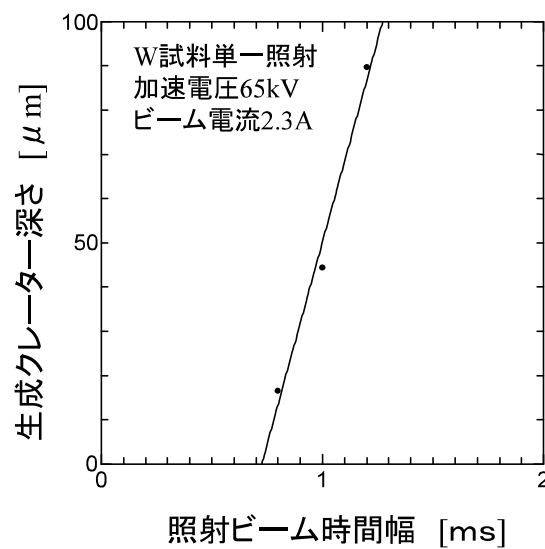
0.8ms

1.0ms

1.2ms



シングルショット電子ビーム照射後のタングステン試料



電子ビーム照射時間幅と生成クレータ深度の関係

Simple estimation of the threshold thermal load on divertor surface with ELM

For Carbon Divertor Case in a Reference:

$$Q / \Delta t^{1/2} = 45 \text{ MJ/m}^2/\text{s}^{1/2}$$

**Q : the ELM energy flux [MJ/m²] on the divertor surface,
Δt : the deposition time duration [s]**

For this Tungsten Case:

Q = 1.0 [MJ] (JEBISカロリメータ測定、参考値) ,

Δt = 0.73 × 10⁻³ [s] (損耗閾照射時間幅値)

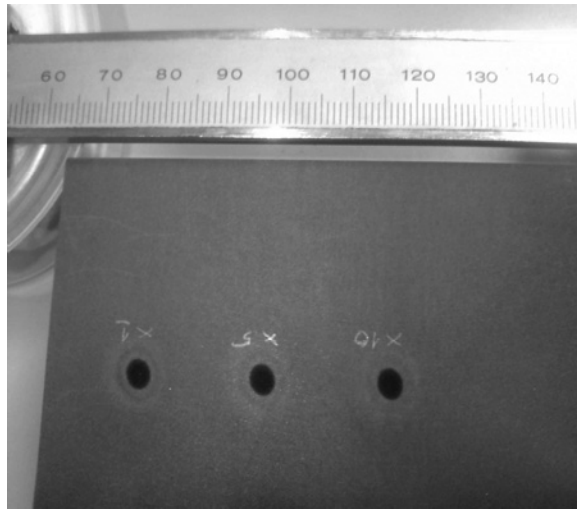
$$Q / \Delta t^{1/2} = 270 \text{ MJ/m}^2/\text{s}^{1/2}$$

単純強度倍率、参考値 270 / 45 = 6 (Tungsten / Carbon:)

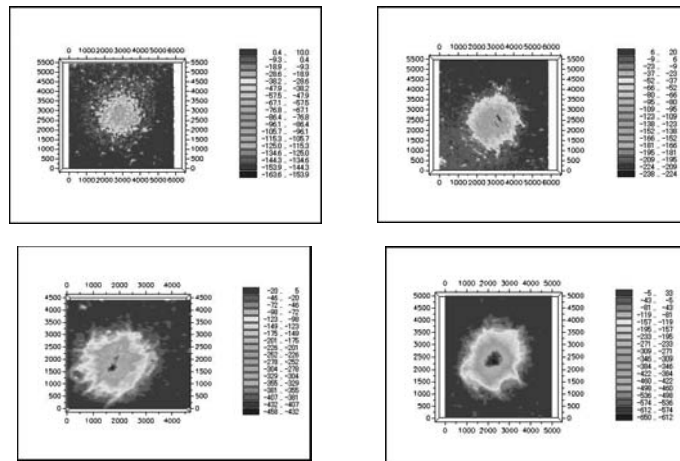
第2グループの照射結果:

同一箇所に照射を重ねる場合、

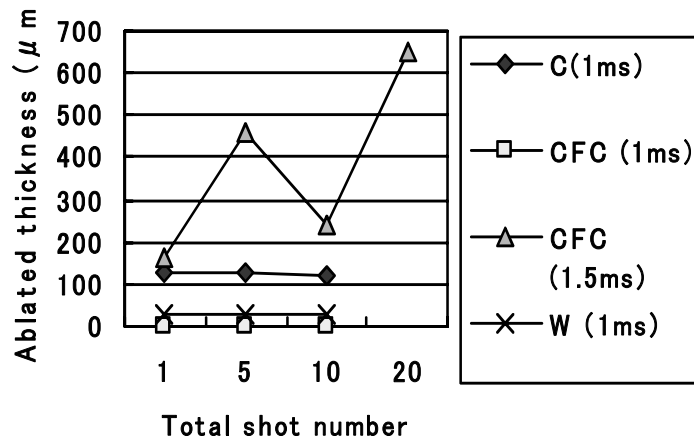
種々の材料サンプル照射、



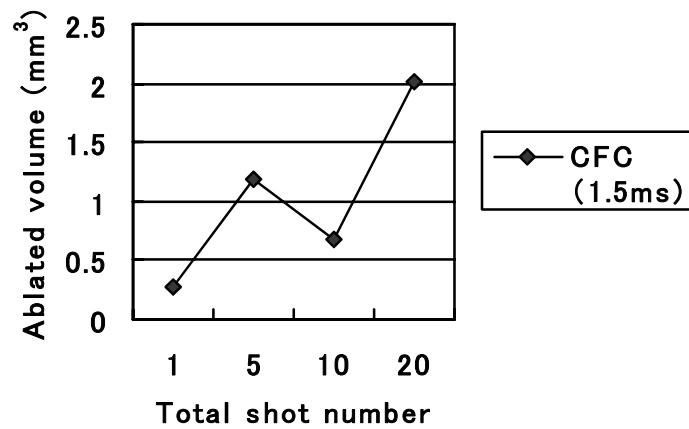
Damage patterns on the graphite sample after the electron beam irradiations.



Measured surface profiles of CFC (carbon fiber composite) after 1.5ms electron beam ablations. From up to down and left to right, with the total numbers of the thermal load accumulation 1, 5, 10 and 20, at the same places.



Ablated thickness vs. total shot number.



Ablated volume vs. total shot number.

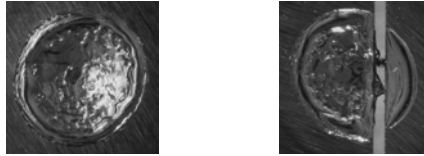
第3グループの照射結果：

単一照射（タングステン、グラファイト）

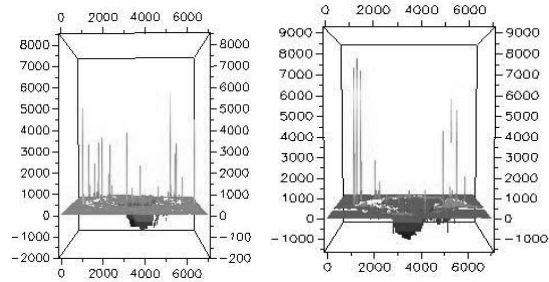
非一様形状試料の照射

- （1）突合せ試料の境界部にまたがる照射
- （2）より長時間幅の電子ビームによる照射
- （3）緩やかな表面形状変化を持つ試料の照射

（1）突合せ試料の境界部にまたがる照射

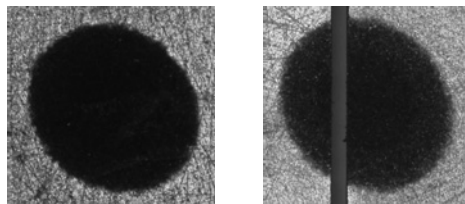


照射後の表面写真例 (左) タングステンの突合せ無しと、(右) 有り



照射後タングステンの表面形状詳細例 (深さ方向データを強調して示した場合の結果、
左は突合せ無の場合、右は突合せ有の場合)

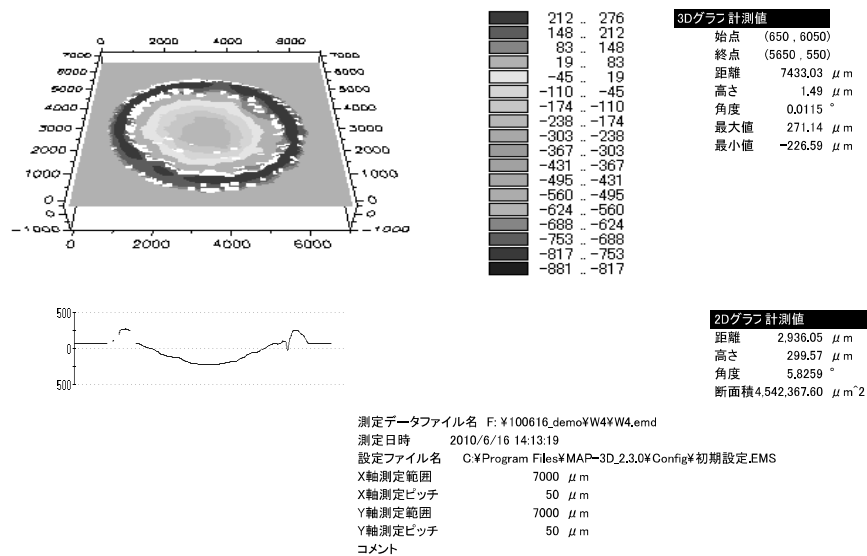
鋭角エッジを有する突合せ試料の境界付近の照射結果(1)



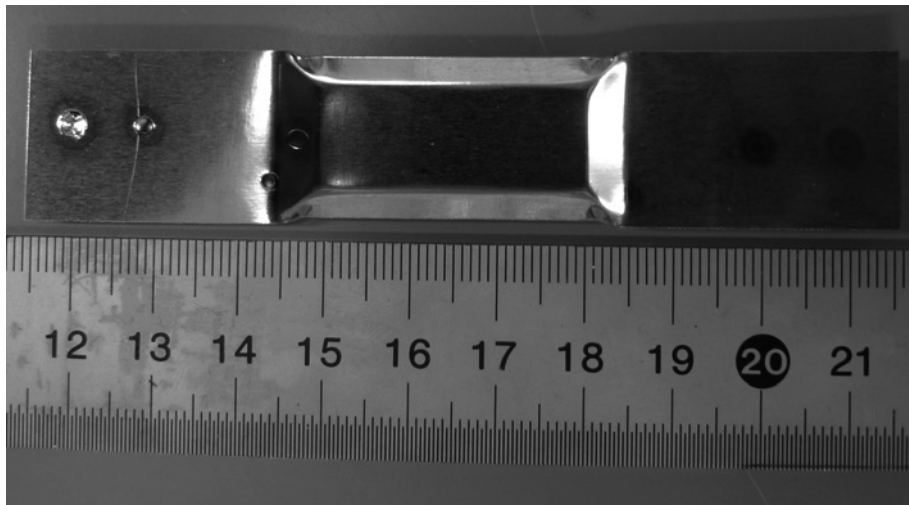
グラファイトの場合の照射後の表面写真例
(左) 突合せ無と (右) 有の各場合)

鋭角エッジを有する突合せ試料の境界付近の照射結果(2)

(2)より長時間幅の電子ビームによる照射



長時間幅ビーム照射時に発生するタングステン・クレーターの形状測定例



#2ポート照射結果

まとめ(1)得られた成果:

那珂研究所・電子ビーム加熱装置(JEBIS)により、種々のダイバータ候補材料試料を照射し、ELM級の高熱流入射による、表面損耗試験を行った。

(1) 広範囲の時間幅入射下において、入射量と時間幅で決まる、損耗開始の閾値に関する相似則様の関係式が成り立つことを確認した。

(2) タングステンの場合の上記閾値を実験的に求め、カーボンの閾値より数倍(参考値)大きな結果を得た。

(3) 同一場所に多重照射を行い、照射数と損耗量変化の関係を明らかにした。損耗量の少ない順序は、CFC, W, Cであることが判った。

(4) 鋭角断面を持つ試料2個を突合せ配置したものの照射を試み、単一平面部に比べて、突合せエッジ部の耐照射強度が低下することを、定性的に示した。

(5) 緩やかに形状変化する薄板W試料の照射も試み、初歩的ではあるが、薄板被覆ダイバータの場合に参考となる表面損耗データを得ることができた。

(2) 今後に期待したいこと:

本報告は、本共同研究に関する最終報告であるが、将来的に、もし可能なら、より精密な損耗関連データの取得が望まれる。また、同データベースの確率により、逆に、損耗量測定子のようなものを核反応装置内に挿入して、通常では測定が不可能となるような条件下での将来装置(JT60-SA, ITER、DEMOなど)の稼動パラメータの測定に利用したい。

成果公表リスト (口頭発表含む)

Koh.Kasuya, S.Ozawa, T.Norimatsu, S.Nakai, S.Suzuki, K.Esato, M.Enoeda, M.Akiba, W.Mroz, T.Renk and M.Sato et al., “Summary of the plasma facing surface material ablations with high-flux pulsed particle beams, UV laser”, 5th IAEA Technical Meeting on “Physics and Technology of Inertial Fusion Energy” 24-26 March 2010 Vienna, Austria, (in print) (2010).

Koh.Kasuya, S.Ozawa, T.Norimatsu, S.Nakai, S.Suzuki, K.Esato, M.Enoeda, M.Akiba, W.Mroz, T.Renk and M.Sato, “Analyses of liquid wall responses against the high flux fusion products”, IAEA Research Coordinated Meeting of Coordinated Research Project on “Pathways to Energy from Inertial Fusion: an Integrated Approach”, 22-24 March 2010, IAEA's Headquarters in Vienna, Austria, (in print) (2010)

糟谷紘一ほか、“標的爆縮に起因する慣性核融合炉壁からの放射とその標的注入スキームならびに炉システムに及ぼす影響”、平成21年度大阪大学レーザーエネルギー学研究センター共同研究報告書、平成22年3月。

K.Kasuya et al., “First Wall Ablations with High-Flux Pulsed Particle Beams, UV Laser Lights and X-rays for Nuclear Fusion Energy Reactor Design Base”, 2010 Eni Award (Recommended and Applied, no selection as final winner) (2009-2010).

K.Kasuya, S.Ozawa, S.Suzuki, K.Esato, M.Akiba, W.Mroz, A.Prokopiuk, M.Sato, K.Shimoda, T.Norimatsu, M.Nakai, K.Nagai, T.Ohshige, H.Furukawa, “Applications of Laser and Particle Beam Apparatuses to Fusion Reactor Plasma Facing Future Research Works”, Proceedings of 4th IAEA Technical Meeting on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers, Kobe, Japan, September 13, 2007, CD-ROM Distribution (2008).

糟谷紘一ほか、“標的爆縮に起因する慣性核融合炉壁からの放射とその標的注入スキームならびに炉システムに及ぼす影響”、平成20年度双方向（核融合科学研究所・大阪大学レーザーエネルギー学研究センター）共同研究報告書、平成21年1月。

K.Kasuya, S.Ozawa, S.Suzuki, K.Esato and M.Akiba, “Material Surface Ablation with ELM-like E-Beam Thermal Load”, Proceedings of the 22nd IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, Albuquerque, NM, USA, CD-ROM Distribution (2007).

K.Kasuya, S.Ozawa, S.Suzuki, K.Esato and M.Akiba, “Simulation Experiments for Divertor Ablation with ELM-like Electron Beams”, Japan-US Workshop on Heat Removal and Plasma Materials Interactions for Fusion, Fusion High Power Density Components and System, and IEA Workshop on Solid Surface Plasma Facing Components, Proceedings of the Japan-US Workshop on Heat Removal and Plasma Materials Interactions for Fusion, Fusion High Power Density Components and System, and IEA Workshop on Solid Surface Plasma Facing Components (2007).

A-5. マイクロ波ロケットの性能向上に向けた研究

資料1-4

マイクロ波ロケットの性能向上に向けた研究



東京大学大学院新領域創成科学研究科 小紫公也、山口敏和
日本原子力研究開発機構 坂本慶司、高橋幸司、梶原健、小田靖久

発表内容

1. 推力、推力電力比の向上
2. ミリ波長距離空間伝送のためのビーム制御の研究
3. ロケットモデル打ち上げ試験

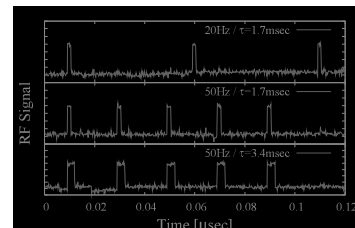
ジャイロトロンマルチパルス発振性能の安定化

Specifications

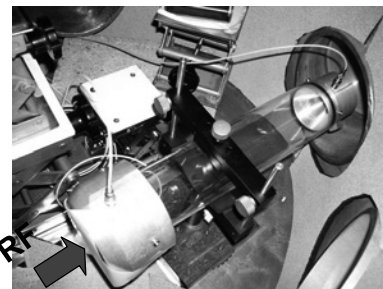
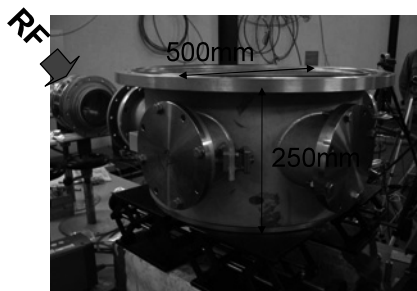
Frequency	170GHz
Output Power P	< 1MW
Beam Profile	Gaussian
Beam waist	40mm
Electrical efficiency	50-60%



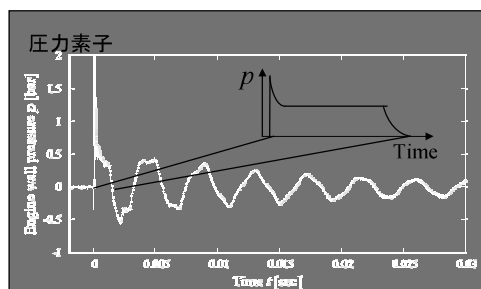
- Repetitive Pulse operation
- Pulse duration 0.5~ 3msec
 - Peak Power ~ 600kW
 - Repetition rate ~ 200Hz

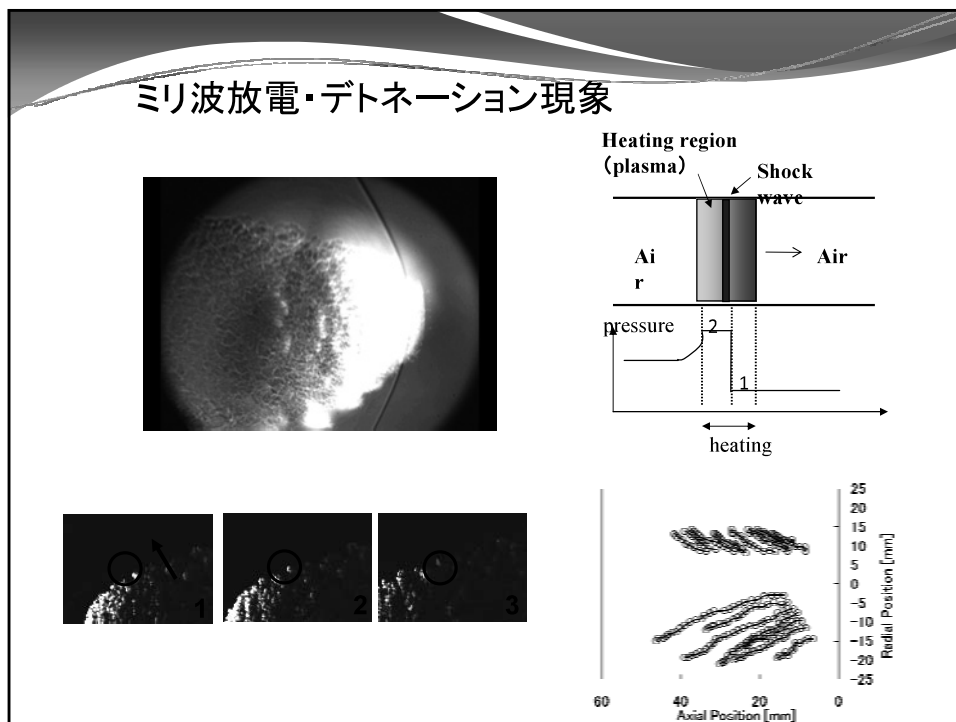
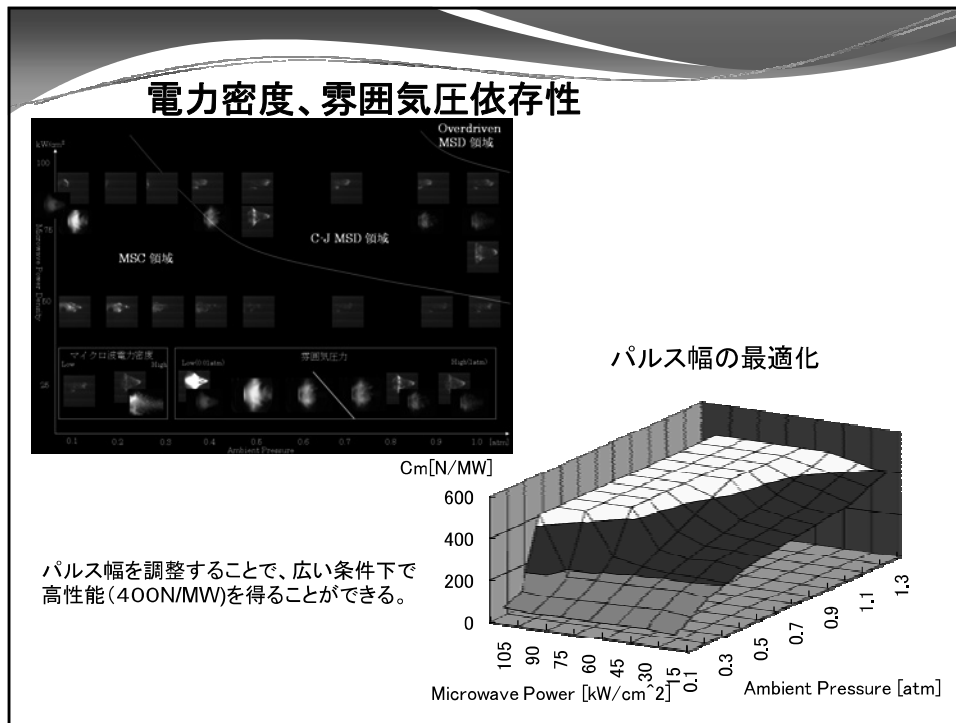


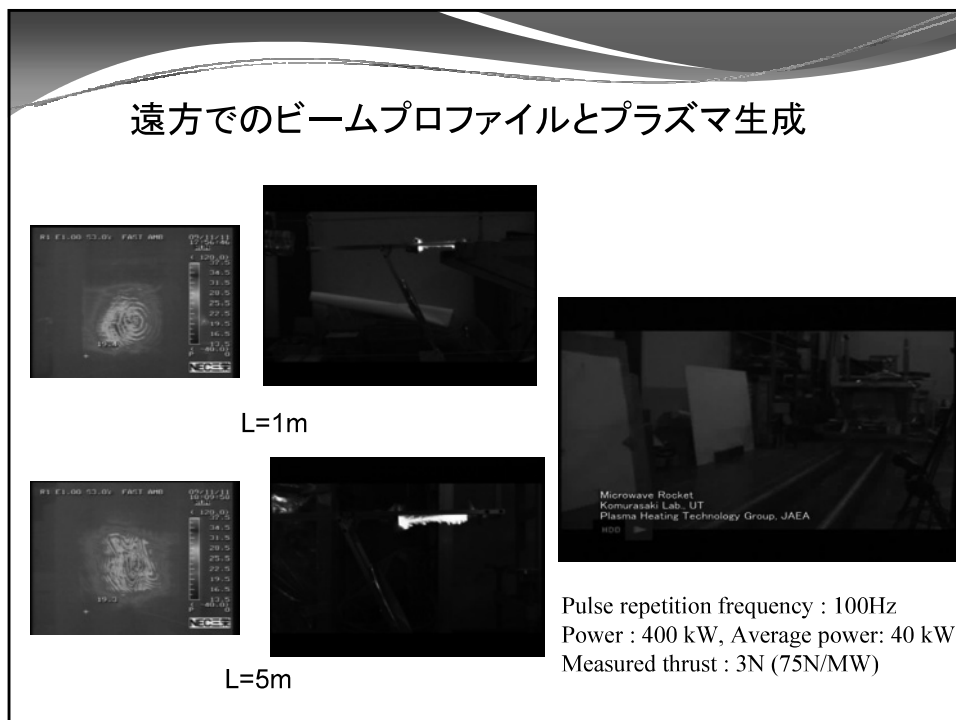
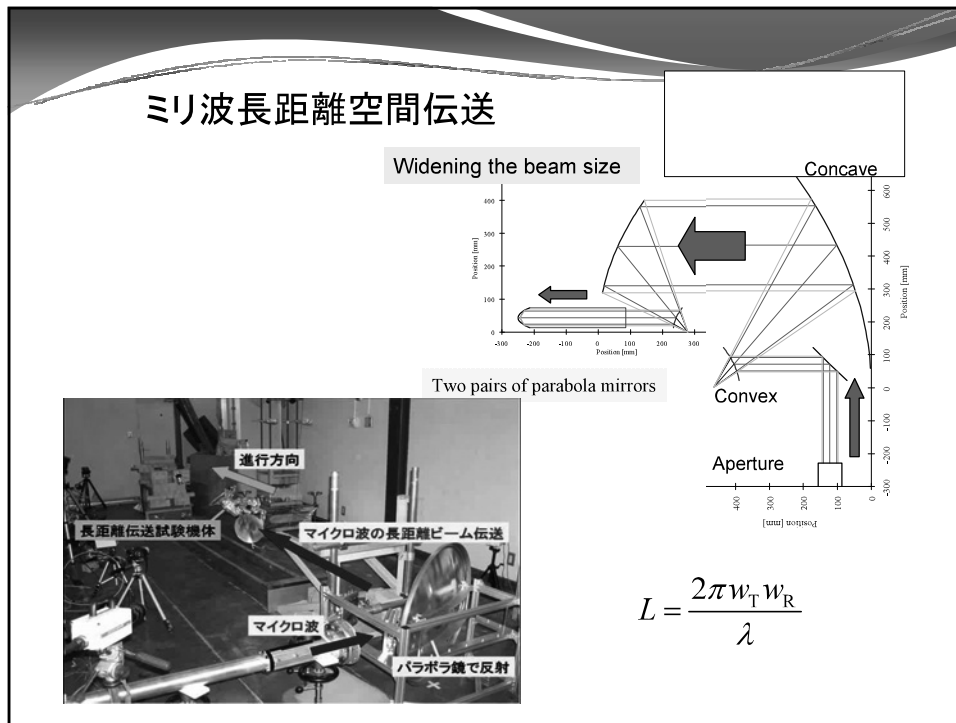
性能測定実験系



ガス種 : 空気
 圧力変化範囲 : 0.01-1atm
 チャンバー直径 : 500mm
 マイクロ波電力密度 : 190-610kW

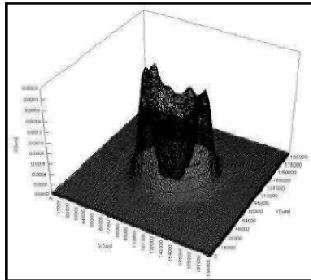




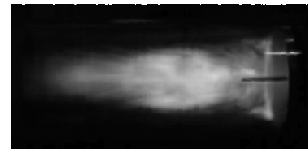
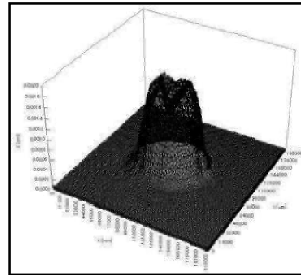


位相制御ミラーによるビームパターン変換

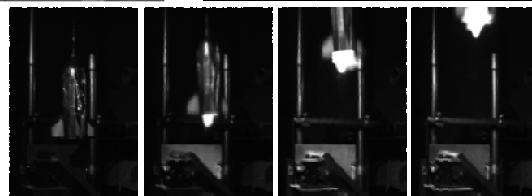
Ring



Flat



打ち上げ試験



Continuous thrust generation for 1.2 altitude was demonstrated.
Power: 600kW, PR frequency: 100Hz, 1.25msec, Average power 75kW

Φ100, L300, 109g
(AI製)

まとめ

1. 推力、推力電力比の向上
 - ジャイロトロン マルチパルス制御性能が向上
 - 性能の電力密度、雰囲気圧力依存性の解明
 - ミリ波デトネーションの物理について理解が深まった
2. ミリ波長距離空間伝送の研究
 - 10m伝送ミラー系を構築
 - 位相変換ミラーによるビームプロファイルの制御に成功
3. ロケット打ち上げ試験
 - 120グラムのモデルを1.2メートル持ち上げることに成功
(cf. 2003年度の実験では1パルスで9.5gのモデルを打ち上げ。)

今後の課題

- 目標: 1kg級のロケットモデルを10メートルの高度まで打ち上げる
- 空気吸いこみ弁の工夫
 - ミラー系の軽量化

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質モル	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエネルギー当分, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報を付たえるために使われる。実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X 線及びγ 線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SI に属さないが、SI と併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SI に属さないが、SI と併用される単位で、SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SI に属さないが、SI と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガール	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系の CGS 単位系と SI では直接比較できないため、等号「 ≐ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SI に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ) 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

