

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540423
 研究課題名(和文) fs レーザー駆動 20 MeV 級準単色電子ビーム誘起による水和電子の生成時間の解明
 研究課題名(英文) Study on timescale of hydrated electron generation using quasi-monoenergetic femtosecond 20-MeV electron bunch
 研究代表者
 森 道昭 (MORI MICHIAKI)
 日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究職
 研究者番号:10323271

研究成果の概要： レーザー駆動電子バンチを用いた水和電子の時間スケールの解明に向け、診断装置(サブ 10fs 光源)の開発と、電子ビームの安定化に関する実験研究を実施した。その結果、9.4fs の光パルスの生成と、ターゲットパラメーターの最適化により従来に比べ 1/3 に抑制された低ビーム発散角電子ビームの生成と 4 倍以上高いビーム位置安定性を持つ電子ビームの生成を実証した。さらに、パラメーター最適化によって、電荷量を着手前に比べ 10 倍以上に向上させた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：T³レーザー 電子ビーム fs レーザー 放射線化学

1. 研究開始当初の背景

パルスラジオリシスは、放射線を物質に照射する際に生じる局所的なイオン化や励起さらにその緩和などの過渡的な現象を分光学的な計測を通じて分析する方法として、30年以上前から研究が進んでいる。研究代表者は、2006年にチタンサファイアフェムト秒レーザーを用いて、非線形相互作用によりレーザーのパルス幅よりも短い約 10fs の時間幅・0.8pC(最適化により現在 2pC 以上)の電子ビームを生成した。この電子ビームは 20 MeV 前後のエネルギーで準単色という特徴を持つ。この電子ビームを用いることで、フェムト秒クラスの水と放射線の化学反応過程の観察に大きく展開することができた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、この高速性を活かし、10 フェムト秒～1 ピコ秒の間の時間スケールで生成されると予想されている水和電子の時間スケールを明らかにする事ために、基礎技術開発を行う。具体的には、10 フェムト秒のパルス幅を持つ分析光源の開発を行い、さらに、電子バンチの安定性がこのような計測において重要であるため、この研究開発を実施する。

3. 研究の方法

2.の目的を達成するために、以下の開発および研究を実施した。

超高速現象を観測するためのサブ 10fs 光源開発、およびそれを光源としたプラズマを

対象とするテスト計測

レーザー駆動電子ビームの安定性向上のためのレーザー装置開発および電子ビームの安定性向上

4. 研究成果

(1) 超高速現象を観測するためのサブ 10fs 光源開発

本研究において、輝度の高い超短パルス光源は不可欠である。チャープミラーや位相変調器に代表される位相コントロール素子の進歩によって、超高速光パルス発生においては、サブ 10 フェムト秒(fs)のパルスが容易に生成できるようになった。この光をプローブ光源に用いることで、準単色電子線発生メカニズムやフェムト秒電子ビームの診断が可能となる。特に中空ファイバーを用いた広帯域光発生については、装置が比較的簡便であること、さらにチャープミラー等の超短パルス光学素子が比較的容易に入手できるようになってきたことから、その応用に注目が集まっている。本研究では、既存のテラワットレーザー装置 JLITE-X (4TW/35fs レーザー装置)に付加させる形で 10fs 光発生系を開発した。

図 1 に開発したサブ 10fs 発生装置のセットアップを示す。これは、テラワットレーザー装置 JLITE-X から発生する 4TW のレーザー光を一部分岐する形で中空ファイバーに入射させスペクトルの広帯域化を行い、系全体の群速度分散(GDD)をチャープミラーで補償することで、最終的に 10fs 以下の光パルスを発生させる。具体的には、35fs/500uJ のレーザー光を、f=300mm のレンズでアルゴンガス(0.09MPa(絶対圧))で囲まれた直径 125um の中空ファイバー中に集光・照射させ、アルゴンガスによって生じる非線形光学効果(光カー効果)によって広帯域化させる(～40nm >200nm)。そして、この光をレンズ(f=300mm)を用いてコリメートを行い、さらに Chirp-mirror によってレンズや窓などの透過媒質と、光カー効果によって広帯域化させる際に副次的に生じる群速度分散を、広帯域用チャープミラー(50fs²/reflection)を用いて補償する。これらによって、広帯域(Δν>0.4PHz)で且つ位相のそろった超短パルス光を生成する。

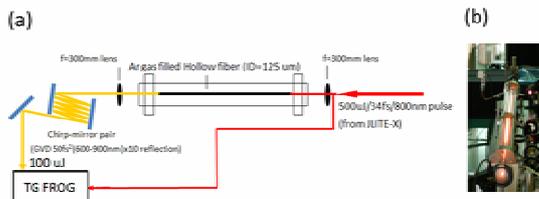


図 1 実験セットアップ(a)および中空ファイバー周辺の写真(b)

本開発に関して、発生した光パルスの概要を調べるため、TG-FROG と呼ばれる光パルス計測装置を用いて評価した。この TG-FROG は、このサブ 10fs 領域の光パルス計測としては典型的な計測装置であり、5fs までのパルスを計測できる性能を持つ。この計測器で評価した時間波形を図 2 に示す。この計測から Chirp-mirror 10 回の反射で最短パルスが得られることを実験的に確認すると共に、9.4fs の光パルスが得られている事を実際の計測を通じて確認した。この妥当性については発生装置全体の分散量および Chirp-mirror での分散補償量の比較から定量的に評価した(表 1)。この結果においても、トータルの群速度分散(GDD)はチャープミラーで 10 回反射において、最短の $\sigma \cdot \sigma' = 20\text{fs}^2$ が得られると見積られ、本結果が妥当であることを理論的にも確認した。

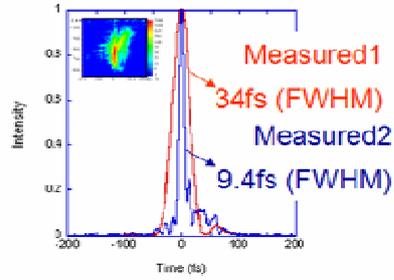


図 2 TG-FROG にて取得した、入射レーザーパルス(Measured1)とチャープミラー後のレーザーパルス(Measured2)。

材質	GDD/L (fs ² /mm)	L (mm)	GDD (fs ²)
Air	+0.021	~ 700	+147
CaF ₂ (Window)	+27.9	3mm x2	+162
SiO ₂ (Lens)	+36.2	2.5mm x2	+181
SPM	-	-	+30
Sub-total	-	-	+520
GDD			
GDD at chirp mirror	-50	10	-500
reflections	(1/reflection)	(reflections)	
Total GDD	-	-	+20

表 1 群速度分散補償に関する妥当性の評価

(2) サブ 10fs 光パルスを用いたプラズマ診断

4-(1)で立ち上げたサブ 10fs 光パルス発生装置を用いて、30MeV 級準単色電子ビーム生成時のメインレーザー光の伝搬の様子を観測した。図 3 および図 4 に実験セットアップのブロック図および模式図を示す。JLITE-X レーザーから発生したレーザー光 (4TW/35fs) を穴あきミラーによって電子線発生部およびサブ 10fs 光プローブ部にそれぞれ 99%と 1%の分岐比で分割する。この分割した光を、光プローブでは 4-(1)で立ち上げた発生装置でサブ 10fs 光を発生させ、適当な時間遅延を与える形で電子線発生用のレーザーと 90 度交差させる構成により光プローブでガスジェット上に入射させる。そして、電子線が発生するタイミングで光プローブを入射させプラズマをバックライトし、そのイメージを補償板、偏光板、および CCD カメラにて構成される偏光顕微鏡にて観測した。図 5 に典型的な準単色電子線発生時のレーザー伝搬の様子を観測した結果を示す。準単色電子線発生時に、レーザー光のチャネリングが発生していることを観測した。

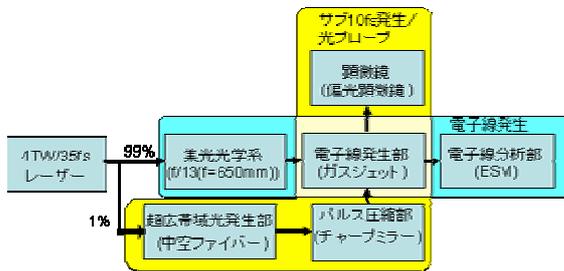


図 3 実験セットアップブロック図

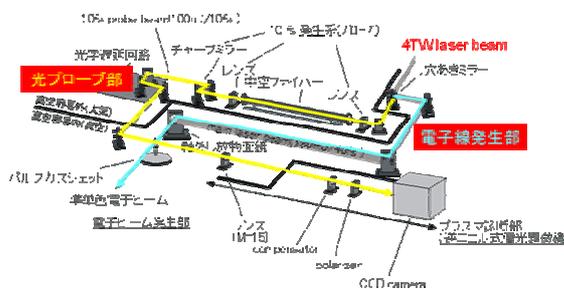


図 4 実験セットアップ

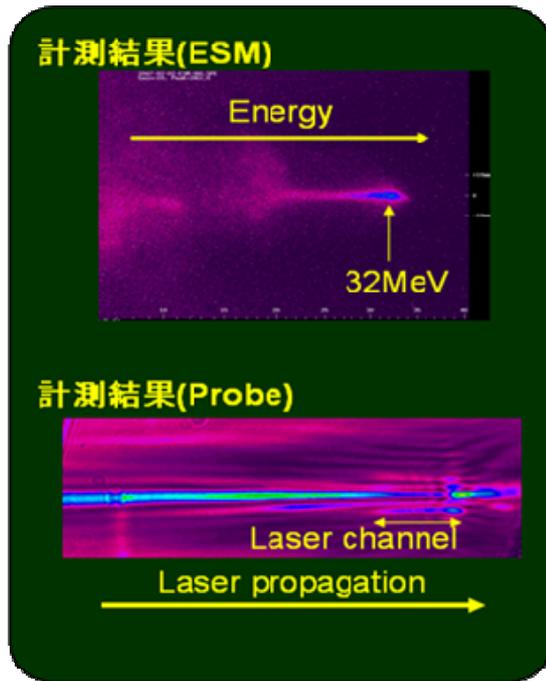


図 5 実験結果(上・蛍光板と CCD カメラで構成した電子線分光器で取得した電子線のエネルギー分解(横軸)イメージ。下・レーザー光のチャネリングのイメージ)

(3) 低ジッター・高プレパルス制御性を持つ²レーザーの開発

プレパルスの高度な制御により、安定した電子ビームの発生が可能である。このような安定的な電子ビームは、パルスラジオリシス研究に於いて重要である。そこで本研究では、このプレパルスを高度に制御したレーザー装置の開発を行った。本開発ではまず高速なパルススライサーの開発と、複数のレーザー装置・電気装置でシステムを構成しているため、そのシステム全般のジッターの低減を行った。

高速なパルススライサーの性能評価は、通常、ピンフォトダイオードなど光-電気変換素子が用いられる。しかしながら、高速性の高いパルススライサーにおいては、このピンフォトダイオードの立ち上がり性能に限界があり、またその取扱いについても非常に注意する必要がある。その一方でチャープパルスは、時間的に周波数が変化するパルスであり、そのスペクトル強度の時間変化を利用することで、消光比および立ち上がり時間を間接的に評価することができる。そこで、このチャープパルスを用いてこの性能評価を行った。図 6 に実験の概要および結果を示す。パルススライサーの遮光タイミングを調整し、チャープパルスがパルススライサーの動

作タイミングから外れた状態(Timing1)を参照パルスとし、チャープパルスの中央で動作を開始した状態(Timing2)を被計測パルスとする。この光を分光器にてスペクトル計測を行うことで、それぞれのスペクトル強度の情報を得る。そして、この2つのタイミングの強度比について波長軸を元々のチャープの傾き (t/λ) を用いて時間に変換することで、最終的に立ち上がり時間を評価することができる。本結果から、130psであることが分かった。

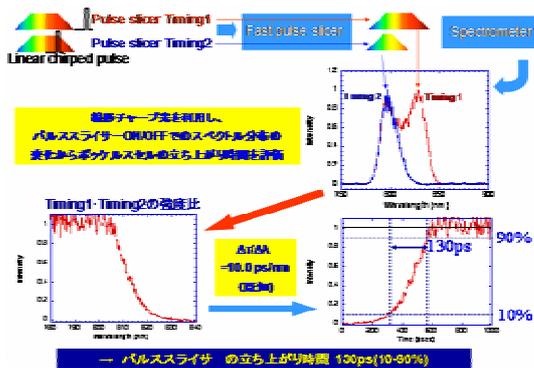


図6 計測実験の概要と結果

この結果は、別途行った相互相関法による計測からも、ほぼ同じ値(130ps(10-90%))が得られており、本計測がこのような素子を評価するのに有用な手法であることを明らかにした。

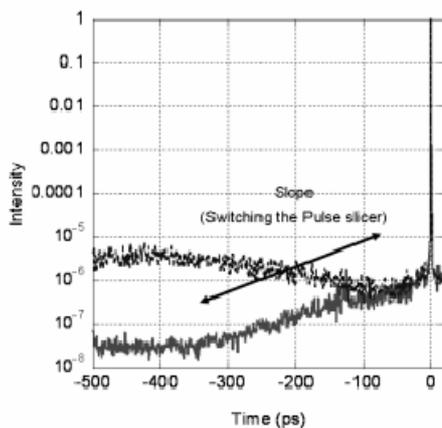


図7 相互相関法によって評価した立ち上がり時間の結果。点線はパルススライサーOFF時・実線はパルススライサーON時それぞれでのパルス波形。本計測から導出される立ち上がり時間は130ps(10-90%)であった。

この開発に続く形で電気ジッターの低減を行った。旧来のシステムでは、トリガー装置が直列的に接続され且つ低い精度(10ppm)の基準周波数源を用いていたために、500ps ~

1nsのジッターがあった。これを改善するため、トリガー系を並列的な接続し、さらにルビジウム原子時計を基準周波数源として利用することで、従来に比べ6桁近い高い精度でトリガータイミングを制御した。

この結果、タイミングジッターは、前述のチャープパルスを用いた評価法をこのジッター計測にも応用することで14ps(平均二乗法による評価)以下であることが分かり、大幅なプレパルスの制御性乗向上を達成した(図10)。

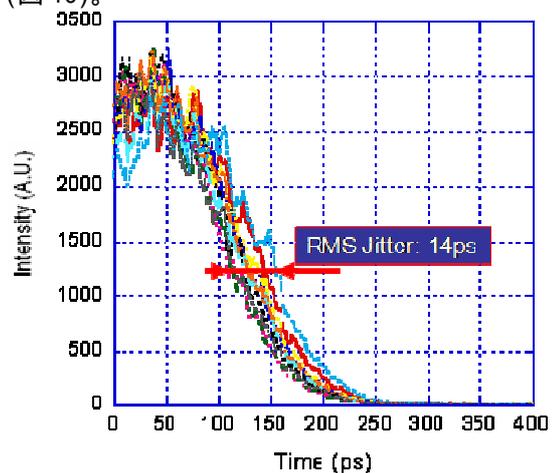


図10 ジッターの評価結果

(3) High-Z ガスを用いた電子ビームパンチの安定化

パルスラジオリシスの研究において、電子ビームの安定性向上は重要な課題である。上記のプレパルス制御性を大幅に向上したレーザー装置でHigh-Z ガスを用いて安定的な電子ビーム発生に関する研究を行った。この研究から、プレパルスを500psに制御した上で従来の研究で広く用いられていたヘリウムガスターゲットから、アルゴンガスターゲットに変更することで、従来に比べ、4倍近くの位置安定性の向上と、1/3以下までビーム発散角の抑制ができることを明らかにした(図11・12)。

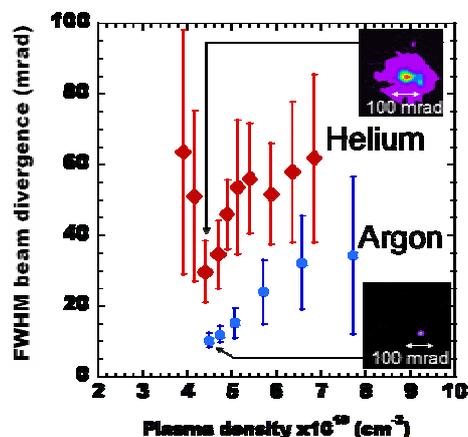


図 1 1 ビーム発散角の比較

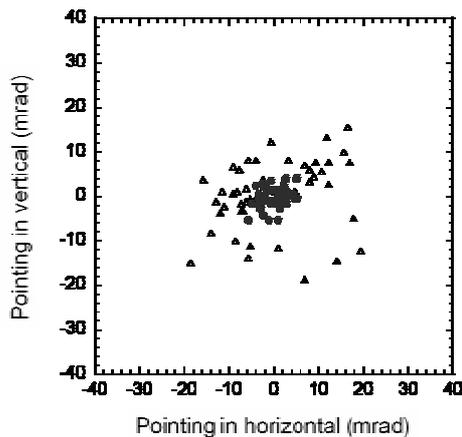


図 1 2 ビーム位置安定性の比較(△:ヘリウム, ○:アルゴン)

さらに窒素ガスターゲットを用いることで、この安定性を確保した上で電子線のエネルギーを従来の 20MeV から 50MeV まで向上させることも明らかにした。また、そのメカニズムについてはレーザーがプラズマ中を伝搬する場合に起こるプラズマ中での屈折が、アルゴンおよび窒素ガスにおいては従来のヘリウムガスに比べて小さく、屈折によるレーザー光の発散が効率的に抑制されるとともに、加速場を構成するウェーク場が長尺化するため、発散角の抑制および位置安定性の向上をもたらされる事を PC を用いた光線追跡計算から明らかにした。この妥当性については実験で別途実施したトムソン散乱計測からも長尺伝搬を示すイメージ計測の結果が得られ、さらにその長尺化された距離も妥当であることが分かった。さらに、この結果は電荷量の向上とその安定性向上にも大きな改善効果をもたらした。具体的には、電荷量においては研究着手前に 0.8pC だった電荷量が、 10 ± 3.3 pC まで向上することができ、また安定性については旧来の 50% から 30% に改善した。

これら一連の結果は、今後のフェムト秒パルスラジオリシス研究につながる重要な成果である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 17 件・すべて査読有())付は 6 番目以降)

- 1) "Ultrarelativistic electron generation during the intense, ultrashort laser pulse interaction with clusters"
Y. Fukuda, Y. Akahane, M. Aoyama, Y.

- Hayashi, (M. Mori), 他 14 名
Physics Letters A, 363, 130-135 (2007)
- 2) "Protons and electrons generated from a 5- μ m thick copper tape target irradiated by s-, circularly-, and p-polarized 55-fs laser pulses"
Z. Li, H. Daido, A. Fukumi, S.V. Bulanov, (M. Mori), 他 15 名
Physics Letters A, 369, 483-487 (2007).
- 3) "Repetitive highly collimated intense proton beam with sub-MeV energy range driven by a compact few terawatt femtosecond laser"
M. Nishiuchi, H. Daido, A. Sagisaka, K. Ogura, (M. Mori), 他 9 名
Applied Physics B, 87, 615-621 (2007)
- 4) "Characterization of an Intense Laser-Produced Preformed Plasma for Proton Generation"
A. Sagisaka, H. Daido, K. Ogura, S. Orimo, (M. Mori), 他 15 名
Journal of the Korean Physical Society, 51, 442-446 (2007)
- 5) "Simultaneous Proton and X-ray Imaging with Femtosecond Intense Laser Driven Plasma Source"
S. Orimo, M. Nishiuchi, H. Daido, A. Yogo, (M. Mori), 他 27 名
Japanese Journal of Applied Physics, 46, 5853-5858 (2007)
- 6) "High-Quality Laser-Produced Proton Beam Realized by the Application of a Synchronous RF Electric Field"
S. Nakamura, M. Ikegami, Y. Iwashita, T. Shirai, (M. Mori), 他 20 名
Japanese Journal of Applied Physics, 46, L717-L720 (2007)
- 7) "High-energy, high-contrast, multiterawatt laser pulses by optical parametric chirped-pulse amplification"
H. Kiriya, M. Mori, Y. Nakai, Y. Yamamoto, M. Tanoue 他 7 名
Optics Letters, 32, 2315-2317 (2007)
- 8) "Laser ion acceleration via control of the near-critical density target"
A. Yogo, H. Daido, S. V. Bulanov, K. Nemoto, (M. Mori), 他 15 名
Physical Review E, 77, 016401 (2008)
- 9) "High-contrast, high-intensity laser pulse generation using a nonlinear preamplifier in a Ti:sapphire laser system"
H. Kiriya, M. Mori, Y. Nakai, T. Shimomura, M. Tanoue, 他 8 名
Optics Letters, 33, 645-647 (2008)
- 10) "Efficient production of a collimated

MeV proton beam from a polyimide target driven by an intense femtosecond laser pulse"

M. Nishiuchi, H. Daido, A. Yogo, S. Orimo, (M. Mori), 他 5 名

Physics of Plasmas, 15, 053104 (2008)

11) "Laser-driven proton acceleration from a near-critical density target"

A. Yogo, H. Daido, S.V. Bulanov, T.Zh. Esirkepov, (M. Mori), 他 13 名

Journal of Physics: Conference Series, 112, 042034 (2008)

12) "Laser-driven proton sources and their applications:

Femtosecond Intense Laser Plasma Driven Simultaneous Proton and X-ray Imaging"

M. Nishiuchi, H. Daido, A. Yogo, A. Sagisaka, (M. Mori), 他 34 名

Journal of Physics: Conference Series, 112, 042036 (2008)

13) "Simultaneous Generation of UV Harmonics and Protons From a Thin-Foil Target With a High-Intensity Laser"

A. Sagisaka, H. Daido, A. S. Pirozhkov, J. Ma, (M. Mori), 他 12 名

IEEE Transactions of Plasma Science, 36, 1812-1816 (2008)

14) "New Method to Measure the Rise Time of a Fast Pulse Slicer for Laser Ion Acceleration Research"

M. Mori, A. Yogo, H. Kiriya, M. Nishiuchi, K. Ogura, 他 27 名

IEEE Transactions of Plasma Science, 36, 1872-1877 (2008)

15) "Demonstration of Laser-Frequency Upshift by Electron-Density Modulations in a Plasma Wakefield"

M. Kando, Y. Fukuda, A. S. Pirozhkov, J. Ma, (M. Mori), 他 14 名

Physical Review Letters, 99, 135001 (2007)

16) "Frequency multiplication of light back-reflected from a relativistic wake wave"

A. S. Pirozhkov, J. Ma, M. Kando, T. Zh. Esirkepov, (M. Mori), 他 15 名

Physics of Plasmas, 14, 123106 (2007)

17) "Phase-contrast x-ray imaging with intense Ar K α radiation from femtosecond-laser-driven gas target"

L. M. Chen, M. Kando, J. Ma, H. Kotaki, (M. Mori), 他 12 名

Applied Physics Letters, 90, 211501 (2007)

[学会発表](計7件)

1) "Energy enhancement by reduction of amplified spontaneous emission (ASE) at

laser-plasma proton source"

M. Mori, A. Yogo, H. Kiriya, 他 27 名
Laser Plasma Accelerators Workshop 2007
Jul. 12, 2007, Portugal

2) "レーザー駆動 30MeV 級準単色電子ビーム発生とその診断"

森道昭 他

日本物理学会

平成19年9月22日、北海道大学

3) "超高速電子プラズマ波計測と電子加速"

近藤公伯 他

日本物理学会

平成19年9月22日、北海道大学

4) "J-KAREN レーザーを用いた高エネルギーイオンビーム発生研究"

森道昭 他

レーザー学会

平成20年2月1日、名古屋国際会議場

5) "4TW 級レーザー駆動準単色電子ビーム発生における電子ビーム発散の制御"

森道昭 他

応用物理学会

平成19年9月4日、中部大学

6) "レーザー航跡場による準単色電子パンチのポインティング安定性"

森道昭 他

日本物理学会

平成19年9月20日、岩手大学

7) "レーザー駆動電子ビームのポインティング安定性の向上"

森道昭 他

ビーム物理研究会

平成19年11月6日、Spring-8 放射光普及棟

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 道昭 (MORI MICHIAKI)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究職

研究者番号:10323271

(2) 研究分担者

近藤公伯 (KONDO KIMINORI)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究職

研究者番号:80225614