

QST

調和ある多様性の創造

NEWS LETTER

National Institutes for Quantum Science and Technology

特集 Special feature

1 J-KAREN-P

2 QSTの研究解説シリーズ③
J-KAREN-P

世界最高水準の研究開発機関を目指して

強力な励起レーザーの光で緑色に
光っている状態のJ-KAREN-P

3 世界最小の
重粒子線治療装置の開発秘話
量子メス「挑戦」の物語

QST INFORMATION



究極のビーム品質を追求

未来を照らす、レーザー光の最先端装置

J-KAREN-P

の価値を高める3つの技術

関西研の歩みと「J-KAREN-P」

1995年の関西量子科学研究所(関西研)発足に合わせて高強度レーザーの開発プロジェクトは始動しました。2010年代には「J-KAREN」として、高強度レーザー研究に利用されています。レーザー出力が1 PW(ペタワット、1,000兆 W)に到達したのを機に、「J-KAREN-P」と改名しました。

これから「J-KAREN-P」で実現を目指すこと

現在、我々は1 PWクラスのレーザーを用いて、高エネルギー電子やイオン、ガンマ線などを出すことを実現しています。次なる目標はELI-NP[※]に並ぶ「10 PW」への到達です。

なぜ、10 PWなのか。それは、この領域が「何もない真空から物質が生まれる現象」である、非線形量子電

磁力学(QED)の世界への入り口だからです。アインシュタインの $E=mc^2$ が示す通り、膨大なエネルギーを一点に凝縮させることで、エネルギーを質量へと変換する。この宇宙誕生の謎に迫る実験が、国内拠点で可能になれば、日本の科学研究は劇的な進化を遂げるはずだ。

この挑戦は理論物理の探究に留まりません。実用面では、医療への応用が期待されています。現在、我々は炭素イオンで1 GeV(ギガ電子ボルト)の加速に成功していますが、レーザーをさらに高強度化し、5 GeVの炭素イオン加速が実現すれば、重粒子線がん治療に利用できるようになります。レーザーの出力を引き上げることは、そのまま装置の小型化と高性能化に直結します。レーザーイオン加速によるがん治療を、誰もが受けられる未来へ。私たちは、科学の限界を押し広げる研究を続けています。

[※]ELI-NP…世界最高出力10 PWを誇る、ルーマニアにある超高強度レーザー科学研究所

3つの基幹技術

「ここでしかできない実験」を求めて、国内外から多くの研究者が高強度レーザー施設「J-KAREN-P」を訪れます。QSTは、ユーザーが求める水準を常に上回る「ビーム品質」を追求し、止まることなく装置のアップグレードを重ねてきました。しかし、1年間に実施できる実験数には自ずと限界が生じます。ビーム品質の向上とともに取り組んでいるのが、DXやAIの積極的な活用による、ビーム供給時間の最大化です。限られたリソースの中で、いかに効率的、かつ高品質な実験環境を提供し続けるか。ここでは、世界トップクラスの実験環境を支える「3つの基幹技術」について、その開発の裏側をご紹介します。



光子量子ビーム科学研究所 部長
羽島 良一

レーザー光を従来比の270%の高い強度で照射することが可能に!



光子量子ビーム科学研究所 主幹研究員
宮坂 泰弘

光ノイズを100分の1に劇的に改善!



光子量子ビーム科学研究所 主幹技術員
今 亮

レーザーの供給時間1日当たり60分増加!



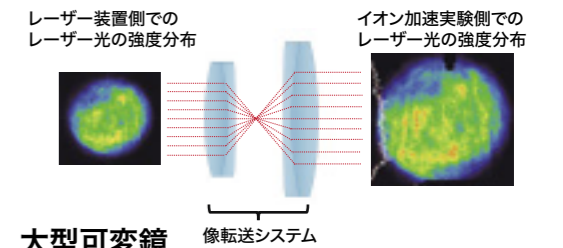
光子量子ビーム科学研究所 技術員
眞柴 雄司

像転送とアクロマティックレンズ

「像転送」は、カメラがレンズを用いて景色をセンサーに写す仕組みと同じです。レーザー室で生成したきれいなビームの像を実験室に転送することで、ミラーなどに損傷を生じさせずに、従来比160%の高いエネルギーをターゲットまで届けることが可能になりました。私の最大の課題は、「J-KAREN-P」という装置に合わせてどうこのシステムを組み込むかでした。像転送のプロセスでは一度レーザーを一点に集光させる必要がありますが、超高出力レーザーを空気で集光させると、空気がプラズマ化し、エネルギーが失われるだけでなくビームのパターンも著しく乱れてしまいます。そのため、真空中で像転送をする必要がありましたが、大人一人が通れるくらいのスペースにレンズを設置するための真空容器を増設するなど既存のビーム伝送ラインを可能な限り生かして導入できるように、設計や配置に頭をひねりました。想定外のことが生じて万が一うまく導入できなかった際には「元の構成にすぐに戻せる」ように対策しておいたことで、思い切って取り組むことができ、成功したのかなと思います。

レンズですが、「J-KAREN-P」は短いレーザーパルスを実現するために複数の波長の光を重ね合わせているため、1枚のレンズでは光の色ごとに焦点がズレて、色にじみが生じてしまいます。そこで2枚のレンズを組み合わせると1つのレ

ンズとして使うアクロマティックレンズを用いています。レンズが2枚に増えると、各レンズ表面からの反射光が複雑になるため、反射光の集光によりミラーなどが損傷しないように配置を工夫しています。



大型可変鏡

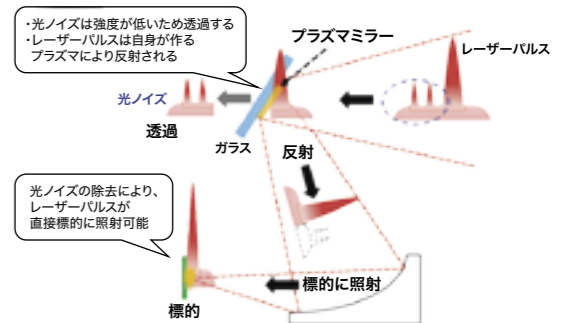
像転送がレーザーをきれいな状態に保ち、より高いエネルギーを実験室に送る技術であるのに対して、大型可変鏡による波面整形は送られてきたレーザーをきれいに集光する技術と言えます。28 cmもの大きさのビームを、一分の隙もなく整えるのは至難の業です。試行錯誤しながら「より早く、より正確に」という独自のノウハウを得て、最大で従来比の170%もの集光強度増大(像転送と合わせると270%)を実現しました。また、レーザーの状態を正確に把握するためのモニター系の設計も不可欠でした。既存のモニターと干渉させないように最適化して導入しました。

光ノイズを除去するプラズマミラー

「J-KAREN-P」のレーザー品質を上げる時間コントラスト^{*}を高める技術にも取り組んできました。

私たちが扱うレーザーは、わずか40 fsという極短パルスの世界です。しかし、この一瞬の「メインパルス」の前には、微かな「光ノイズ(プレパルス)」が紛れ込んでいます。レーザーの集光強度が上がるとこの光ノイズの力も大きくなってきてしまい、メインパルスが届く前に光ノイズが実験ターゲットを破壊してしまうという問題がありました。これを解決するのが「プラズマミラー」です。仕組みは非常にユニークで、素材はガラス基板です。まず、不要な光ノイズが届くと、それは透明なガラスをそのまま透過します。しかし、強度の高いメインパルスが到達した瞬間、ガラスの表面が劇的にイオン化して「プラズマ」へと姿を変えます。プラズマは光を反射する性質を持つため、メインパルスだけを跳ね返し、ノイズだけを背後へ逃がす「超高速スイッチ」として機能するのです。

この装置の導入により、グラフェンのような0.3 nm程の極薄のターゲットを用いた実験が可能になりました。ノイズが除去された「クリーンな状態」で照射できるようになったことで、これまで実施できなかった実験が可能となりました。



^{*}レーザーパルスの時間波形をピーク強度との比で表した値。時間コントラスト比が高ければ高いほど高性能なレーザーパルスとなる。

自動検査システムで省力化し、供給時間を延ばす自動化

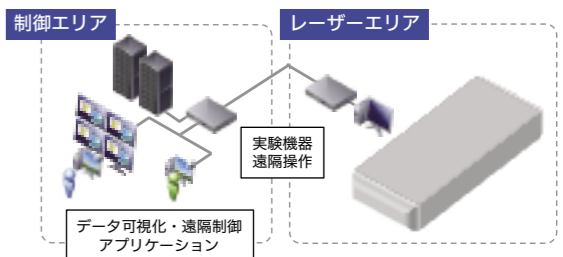
「J-KAREN-P」は縦30 m×横15 mに及ぶ大型施設で、使用されるミラーの数は400枚を超えます。これまでは4名の運転員がマグライトを手で、1枚ずつミラーの損傷などを目視で確認していました。この作業を省力化するため、AIによる自動検査システムを開発しました。最大の課題は、AI学習用の「損傷画像」が圧倒的に不足していたことでした。本来壊れてはいけないミラーの損傷データは数少なく、かといって学習のために高価なミラーを壊すわけにもいきません。そこで、正常なビームプロファイルだけを学習し、そこからの「わずかな差異」を検出する最新手法を導入。試行錯誤の結果、95%という高い精度で異常を検知することに成功しました。

レーザー機器の立ち上げも自動化に取り組みました。スイッチを入れるなど運転員が手動で行う部分を自動化し、最終的に1日当たりのレーザー供給時間を1時間延長することができました。たかが1時間、されど1時間。実験回数

(ショット数)が増えることは、ユーザーにとって何よりうれしいことです。

アイデアを凝らした遠隔操作

施設全体のDXも進行中で、目標は「ネットワーク越しに、どこからでも実験ができる環境」の構築です。鍵が必要な古いレーザー機器から最新のPC制御のレーザー機器まで、仕様がバラバラな装置群を統合するのは至難の業でした。家の鍵を自動で開ける「スマートロック」のような既製品も柔軟に取り入れています。



Message



技術開発の積み重ねでJ-KAREN-Pの価値がますます高まれば、国内外から意欲的なユーザーが集まります。かつてないイノベーションが生まれることを願い、私たちは研究と技術開発を加速させていきます。



プレスリリース

レーザーによる炭素イオン加速で1ギガ電子ボルトに到達—がん治療装置の小型化や宇宙における極限状態の再現につながる成果—



プレスリリース

光が金属の中を突き進む!—相対論効果が拓くレーザーイオン加速の新世界—

世界にインパクトを与える
QSTの研究解説シリーズ③

J-KAREN-P レーザー

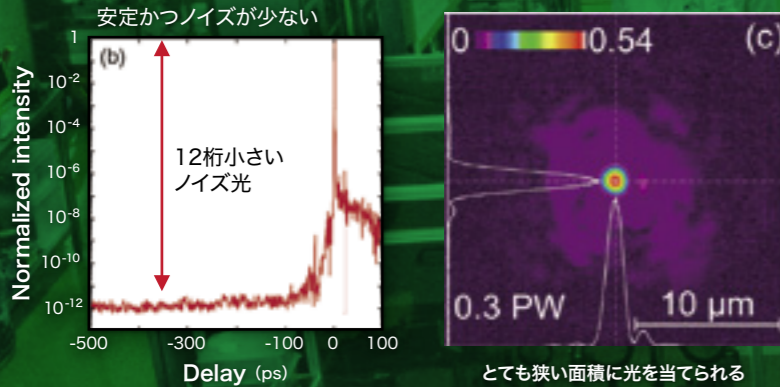
世界の超高強度レーザーのフロントランナー

光子量子科学研究所
先端レーザー科学研究グループ
グループリーダー
桐山 博光

桐山グループリーダーは
高強度レーザー分野の
権威なんだよ!



世界に誇る、時間コントラストと集光性能



(左) J-KAREN-Pレーザーの主パルス光とノイズ光の強度の比はプラズマミラーと組み合わせるとで、15桁に達します。

(右) 集光したレーザー光の径は1.35 μm(マイクロメートル)まで小さくなります。



目視では絶対に
確認できないね!
細菌(0.5~5 μm)の
サイズくらい

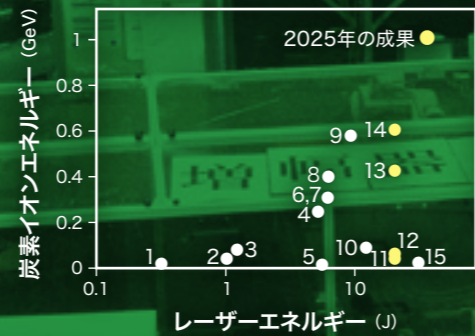
世界トップクラスの レーザー研究施設J-KAREN-P

1 PWというパワーだけではなく、世界最高品質のビームが国内外の研究者や研究機関、大学から一目置かれる研究施設です!

J-KAREN-P性能

| | |
|---------|------------------------------------|
| 照射エネルギー | 30 J/pulse |
| コントラスト比 | 10 ⁻¹⁵ |
| 中心波長 | 810 nm |
| 繰り返し | 0.1 Hz |
| パルス幅 | 30 fs |
| 集光強度 | 10 ²² W/cm ² |

高効率の炭素イオン加速を達成 — 極短パルスレーザーでは世界 —



1. プラズマ物理レーザー核融合研究所(ポーランド), IPPLM レーザー(2020).
2. 北京大学(中国), 40TWレーザー(2023).
3. マックスボルン(ドイツ), 30TWレーザー(2009).
4. ラザフォードアップルトン(イギリス), Gemini レーザー(2015).
5. 中国科学院(中国), PWレーザー(2015).
6. ...
10. ラザフォードアップルトン(イギリス), Gemini レーザー(2010).
11. QST関西研(日本), J-KAREN-Pレーザー(2022).
12. QST関西研(日本), J-KAREN-Pレーザー(2025).
13. QST関西研(日本), J-KAREN-Pレーザー(2023).
14. QST関西研(日本), J-KAREN-Pレーザー(2024, 未発表データ).
15. エコールポリテクニク(フランス), LULI 100TW レーザー(2002).

超高強度レーザーで わかること

レーザーを物質に当てると、ガンマ線からTHz(テラヘルツ)という広範囲な波長の光が発生し、例えばX線だとレントゲンのような非接触で物質の中を見ることができます。パワーが大きければ、大面積で、深い領域まで見えます。

世界中で開発競争が激化する超高強度レーザー 世界トップのレーザー加速

100兆分の3秒(30 fs)の短時間に、1 PWに達する光を放つ超高強度レーザー開発は世界中で行われています。ルーマニアの極限光研究所-核物理学研究施設(ELI-NP)が10 PWとより高い出力ですが、J-KAREN-Pレーザーの高いビーム品質を生かして極短パルスレーザーでは、炭素イオン加速において世界最高エネルギーであるこれまでの記録0.6 GeVを大きく更新した1 GeVという数字を達成しました!



J-KAREN-Pは
デニスコートサイズ!

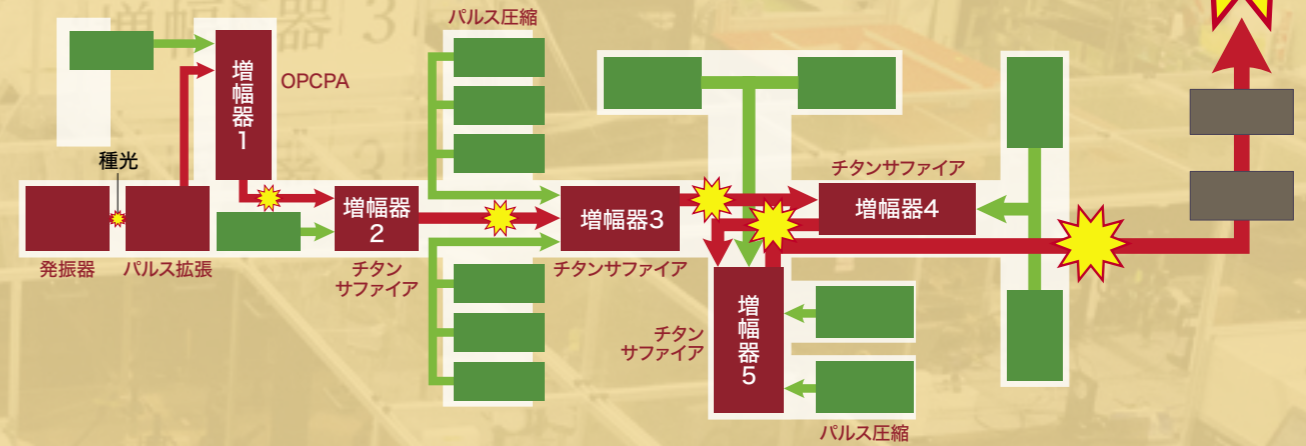


J-KAREN-Pレーザー発光の仕組み

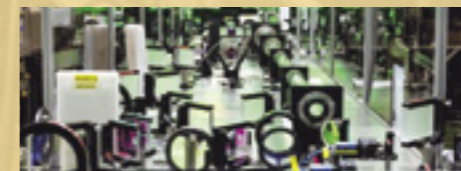
簡単解説!
どうやってレーザーを
発生させるの?

レーザーは全長200 mに及ぶ光路の名所に
配置された5つの増幅器で増幅され、発振器
方の微弱な種光は100億倍に増幅されます。

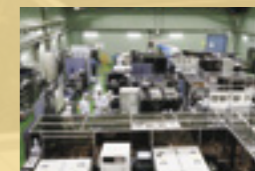
種光は
100億倍に!



種光を増幅するためのチタンサファイア結晶の活性化には、緑色で発振するレーザーエネルギーを与えて励起する必要があります。



結晶を活性化させるために、緑色の励起レーザーを外部から照射します。約20台もの励起レーザーを投入して、それぞれに対してビーム径を整えるレンズや正確な位置へ導くミラーが必要です。



光路の設計では、チタンサファイア結晶におけるレーザーエネルギー密度とレーザー増幅回数を最適化しました。これにより、レーザー取り出し効率を理論限界まで高めることができました。

もっと知りたい!

J-KAREN-P

1ペタワットって どのくらい?

J-KAREN-Pは1 PW。一般的な、100万 kW(キロワット)級の原子力発電所の100万分に相当するパワーを出すことができます。

フェムト秒って?

fs=1,000兆分の1秒です。光は0.3 μm(ウイルス程度)しか進みません。

パルスレーザー

高エネルギーの粒子を発生させるような超高強度レーザーは、非常に短い時間(~fs)の間だけ発生するパルス状の光です。

J-KAREN-Pレーザー 安定動作のための工夫

- レーザーの建物と他の部屋は廊下で切り離されていて、振動が伝わらないようになっています。
- 年間を通じて、温度は22°C±1°C、湿度は50%と常に一定になるように制御されています。
- クリーンルームになっていて、白いツナギの服、帽子、ゴーグル、マスクをして入ります。塵や埃があると、レーザーの状態に影響を及ぼすからです。
- 白い服の技術員は、ベルトの色で見分けています。

「世界標準の基礎技術」となった OPCPA+チタンサファイア方式

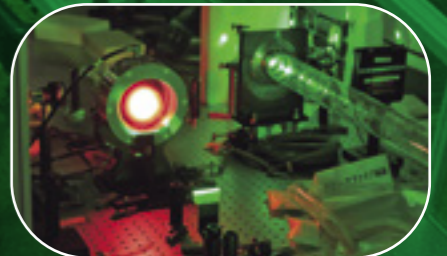
OPCPA(光パラメトリックチャープパルス増幅)とチタンサファイアレーザーを組み合わせたハイブリッドレーザー(J-KAREN-P)により、きれいなパルス、つまり不必要な光ノイズがないパルスを初めて生成できることを実証しました。この成果報告を、国際会議等で発表すると、各国のレーザーの関係者が取り入れて、世界の標準技術となっています。



プレスリリース
小型装置で世界最高のレーザー出力を達成
— 高コントラストの高強度レーザー光を実現 —
(2007年8月9日更新)

OPCPAという手法を
ペタワット級
チタンサファイアレーザー
に導入したのは私です!

人工のサファイアにチタンという物質を少量注入したものがチタンサファイア結晶です。そのチタンサファイア結晶を緑色で発振するレーザーで活性化させることによって、高強度の光を増幅することができます。



赤色に光る人工チタンサファイア結晶

QSTは2016年の発足以来、重粒子線治療装置の小型化・低コスト化という課題に対し、「量子メスプロジェクト」を推進し、挑戦しています。2025年10月に量子メス棟が完成し、今年はいよいよ実証機の設置工事が開始されます。プロジェクト開始から長い年月を費やし、不可能を可能にしてきた研究者たちの「挑戦」の物語をご紹介します。

いよいよ始動！
量子メス「第4世代」

世界最小の重粒子線治療装置を開発せよ！

挑戦

HIMACから第4世代へ

120 m×65 m 1993

HIMAC
世界初の医療用重粒子線がん治療装置

65 m×45 m 2010~

普及型第2~3世代
国内・大型拠点病院など5カ所

45 m×33 m 2027

量子メス(第4世代)
さらなる小型化と治療の高度化を実現するための技術を実証

10 m×20 m

量子メス(第5世代)へ
中小規模の病院施設内に設置可能なサイズに

治療の高度化
マルチイオン源
小型化
超伝導シンクロトロン

量子メスの技術

主な出来事

- 1984 「第1次対がん10カ年総戦略」の一環としてHIMACの建設計画開始
- 1993 重粒子線がん治療装置HIMAC完成
- 1994 重粒子線がん治療の臨床研究開始
- 2003 高度先進医療に認可
- 2004 医療用重イオン加速器の小型化2カ年計画開始
- 2010 第2世代治療装置(普及型)群馬大学などに設置、治療開始
- 2013 第3世代治療装置(普及型)九州国際重粒子線がん治療センターなどに設置、治療開始
- 2016 一部の治療が保険適用となる超伝導技術を用いた回転ガントリーを開発
- 2022 保険適用となる治療対象が拡大マルチイオン源開発
- 2024 マルチイオン治療照射をQST病院にて実施
- 2025 量子メス棟完成
- 2026 量子メス(第4世代)実証機設置 工事中
- 2027 量子メスによる実証開始予定

重粒子線治療装置のパイオニアとして
第4世代「量子メス」までの「挑戦」の歴史

量子医学研究所
物理工学部
部長 岩田 佳之

「本当に実現可能なのか？」——国内外の研究者や産業界から疑問視されてきたのが、重粒子線治療装置に関わる数々の研究開発です。しかし、私たちは「できない」を「実現」へと変える挑戦を積み重ね、ついに第4世代「量子メス」の完成を間近にしました。

HIMACは、世界で初めて重粒子線を医療に利用した画期的な装置でした。しかし、莫大な建設費や広大な敷地を要すること、多額の運営費が課題となり、普及のためには小型化が不可欠でした。私たちは加速器開発の経験を生かしつつ、ピーク性能を求めるとだけでなく、医療装置に求められる高い安全性やビームの安定性、装置の操作性などを追求してきました。その開発もまさに「挑戦」の連続でした。

3分の1サイズに小型化した第2~3世代では、イオン源の永久磁石化、線型加速器の短縮、パワー半導体による電源の小型化、スキャンング照射技術など、当時の世界初となる技術革新を次々と成し遂げてきました。

QSTは、重粒子線治療を誰もが受けられる社会を願い、装置の全国普及を目指してHIMACの40分の1サイズ(第5世代)に挑む「量子メスプロジェクト」を推進しています。「量子メス」の重要な要素技術がさらに高度な治療を可能にする「マルチイオン源」と、大幅に小型化するシンクロトロンの「超伝導化」です。本稿では、この2つのプロジェクトに関わる研究者たちの「挑戦」を紹介します。

開発者たちの「挑戦」物語

要素技術①

マルチイオン源

性能を追求した改造と 新たな技術の開発に挑戦

量子メスの重要な要素のひとつ「マルチイオン源」。その開発は、改良・試験・改良…の連続でした。安定化・強強度を求めた開発の舞台裏です。

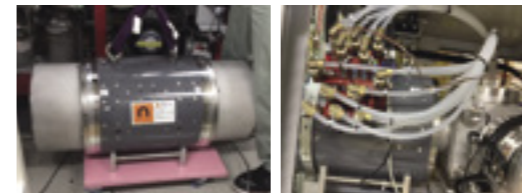
量子医学研究所
物理工学部 研究統括
片桐 健
KATAGIRI KEN

1 安定化・強強度化の追求、 改造と新たな技術の開発

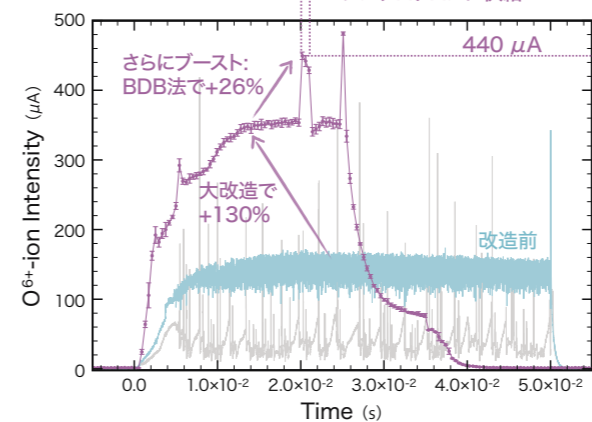
マルチイオン源装置の特徴は、大幅な小型化やメンテナンスフリーであること、4種のイオンの高速切り替えができることです。2022年の完成時には、ある程度の性能は得られることができていました。しかし、プラズマが不安定で、それが取り出されるイオンの強度をさらに増強する際の足かせとなっていました。電子サイクロトロン共鳴(ECR)イオン源では、磁場を用いたECR加熱によりプラズマを閉じ込めます。プラズマが不安定な原因はこの磁場分布であると考え、その問題を解決しようと完成していたイオン源の大改造に取り組みました。マルチイオン源には永久磁石を用いているため、この磁場を変えられません。そこで、永久磁石の間に「調整用コイル」を配置するという、常識外れの改造を提案しました。提案した自分もなかなか不安でしたが、幸いにも共同研究者とメーカーから理解を得ることができ、永久磁石の改造に着手することができました。(図①)

この大改造により、磁場を適切にすることが可能になり、大幅にプラズマを安定化できたことに加え、イオン強度も130%増強できました。また、この改造とは別に新たな技術「Bias-disk Boost法(BDB法、QST特許出願済)」も開発し、強度をさらに26%(図②)増やすことができました。

図① 改造前・後の永久磁石



図② 改造とイオン強度の変遷



2 高速イオン切替えを実現した ユニークなアイデア

これまでのイオン源には、素早いイオン種切り替えは不要でした。しかし、量子メスが目指すことのひとつは「患者に負担をかけない治療」の実現です。量子メスで実施するマルチイオン治療では、ヘリウムイオン、炭素イオン、酸素イオン、ネオンイオンを用います。そのために要求されたのは、それらイオンを1分程度で切り替えることでした。マルチイオン源完成時は、その切り替え時間は1~2分でした。でも、「もっと短くできる可能性がある」と思い、さらに短くする方法を考えてみました。

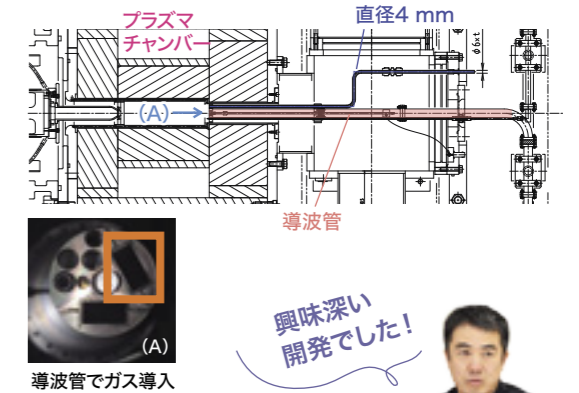
切り替え時間を短くするためのポイントはガス供給管を太く短くすることでした。スペースの制約から管を太くすることは不可能でしたので、「マイクロ波を送る導波管に、イオン生成の元になるガスも一緒に流す」ことを考えました。マイクロ波による放電が懸念でしたが、無事に使えることが確かめられました。本来はガス用ではない導波管を流路として用いることで、1~2分であった切り替え時間を20秒以下(イオン切り替え組み合わせにより変化)にまで短縮できたのです。(図③)(QST特許出願済)

3 「誰も通らない道を歩く」研究開発

これらの成果が得られたのは、「誰も通らない道を歩いたら、100円玉を見つけたようなもの」と考えています。新たな技術を要求されて開発に挑めば、まだ誰も挑んでいないがゆえに、誰でもそこに落ちている新たな発見をしやすい、ということです。その点で、その要求が生まれる量子メスやマルチイオン治療のプロジェクトを進められていることに、ありがたみを感じます。

次のミッションはこのイオン源とその下流の線型加速器・シンクロトロンを組み合わせた立ち上げです。それに加えて、全く新しいイオン源の研究開発も進められればと思っています。

図③ 太いガス導管を大気側からプラズマチャンバーまで導入



要素技術②

超伝導シンクロトロン

四角型の超伝導シンクロトロンで 劇的な小型化を実現!

治療装置として求められる性能を達成しつつ劇的な小型化を実現するために挑んだのは、2014年当時では製作不可能と思われた仕様の超伝導磁石でした。

量子医科学研究所
物理工学部
先進粒子線治療システム
開発グループ
グループリーダー

水島 康太
MIZUSHIMA KOTA

加速器エンジニアリング(株)

藤本 哲也
FUJIMOTO TETSUYA

HIMACからの技術者(コイル設計や磁場設計)。常に研究者と共に研究・開発に取り組んできた。研究者の要求にアイデアを出すなどして共に開発してきた仲間。

開発パートナー
藤本さんにも
聞きました



水島グループリーダーと二人三脚で、世界でここだけの90度に曲がった湾曲形状の超伝導磁石の開発に大きく貢献されました。

1 性能を維持したまま小型化する難しさ

装置全体の小型化を左右するのは、シンクロトロンの小型化です。しかし、物理的な制約から「小型化」と「高性能」は往々にして相反します。加速器を小さくすれば、ビームの量・強度・安定性などの性能が損なわれてしまいます。「量子メス」では、小型化しつつも従来の治療性能を維持、あるいは向上させることが不可欠であり、これが極めて困難な課題となりました。ビーム強度を高めるための設計変更が、別の性能に悪影響を及ぼし成り立たないなど、試行錯誤の連続でした。

2 なぜ、量子メスのシンクロトロンは四角型なのか?

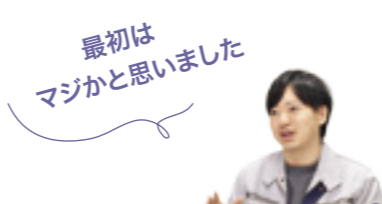
超伝導は、極めて高い磁場を発生させるために不可欠な技術です。加速器は、コイルに電流を流して磁場を生む「電磁石」で構成されています。この電磁石を超伝導化すれば、磁場強度が高まるため装置の小型化が可能になりますが、装置価格は高くなるため磁石の個数を最小限にしなければなりません。一方で、シンクロトロンはリング状の軌道(円形や多角形など)を維持する必要があります。個数を減らすために磁石1台を大型化しすぎると、今度は製品化が困難になります。将来の普及を見据えた設計プランとして導き出した最適解は、磁石数を抑えた「四角形」のレイアウトであり、磁石1台当たりのサイズを3 m x 2 m程度に収める構成でした。(図①)

3 超伝導シンクロトロン用の超伝導磁石の開発

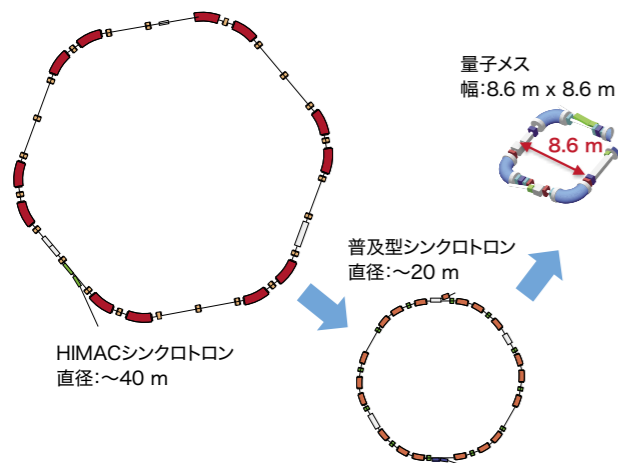
超伝導技術で磁場を強めれば装置を小型化できるとはいえ、全てのコンポーネントが超伝導化されるわけではありません。周辺機器の多くは従来技術のままでありながら、装置のサイズを半分以下、面積比で4分の1以下に凝縮しなければなりません。正直なところ、最初は「無理ではないか」という思いが先行しました。

解決の糸口となった一つのアプローチがあります。重粒子線を取り出す際、一般的には静電分離装置(ESD)を用いて、周囲ビームから取り出し、ビームを「かんなで削り出すように」分離させます。従来手法では、分離されたビームは外側へ広がり続けるため、超伝導磁石を通過する際にはビーム幅が非常に大きくなってしまいます。これに対応しようとすると大口径の超伝導磁石が必要となり、装置の大型化を招いてしまいます。この課題に対し、私は「分離した直後に、あえて内側へ蹴り戻す」という軌道設計を考えてみました。1~2カ月ほど計算を繰り返した結果、従来とは異なる特異なビーム軌道が生まれ、これを利用した小型化につながる新しい機器配置の可能性が見えてきたのです。

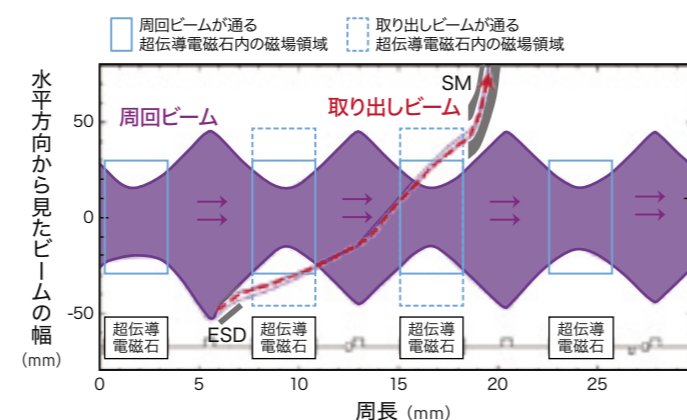
最終的に、磁石を追加して強制的に蹴り戻すという当初の案自体は採用されませんでした。既存の磁石の配置を工夫することで、同様の機能を別の磁石に持たせるという解に辿り着くことができました。この試行錯誤から生まれた配置案が、現在の設計のベースとなっています。(図②)



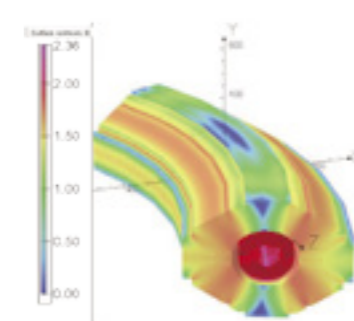
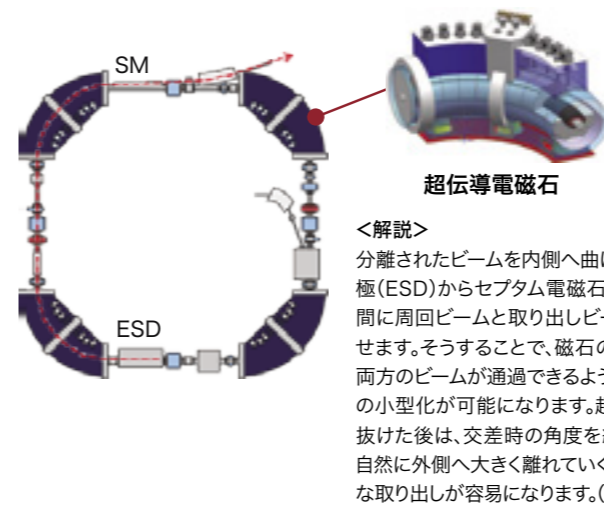
図① HIMACから量子メスまでのシンクロトロンの変化



図② シンクロトロン内のビーム軌道



図③ 三次元電磁場設計



<解説>
超伝導磁石には、わずかな発熱で超伝導状態が崩壊する「クエンチ」という現象が常に付きまといま。装置をコンパクトにするという制約の中で、クエンチのリスクを下げるには、いかに励磁電流(電流値)を抑えるかが鍵となりました。そこで着目したのが、電磁石の全景図にある「ヨーク(鉄心)」の形状です。中央の赤い部分が超伝導コイルですが、この周囲を囲むヨークの形状を工夫することで、磁場分布を最適化できます。(藤本)

1 TOPICS

ウクライナの災害医療関係者向け研修を実施しました

2026年1月21日(水)、独立行政法人国際協力機構(JICA)に招かれたウクライナ保健省、緊急災害医療センター、ボゴモレツ国立医科大学関係者6名を対象にQSTにおいて研修を実施しました。JICAが実施する研修でウクライナの災害医療関係者がQSTを訪れるのは、2024年8月の施設見学に続き2回目となります。今回は、2026年1月18日(日)から1月25日(日)までの期間に実施された、日本の災害医療、緊急医療チームの知見を適用し、ウクライナの緊急・災害医療体制の強化を目指す研修の一環として、QSTが放射線災害研修を担当しました。

本研修では、放射線医学研究所の専門家が、緊急被ばく医療の概要、放射線災害発生時の初動対応、医療機関における緊急被ばく医療、被ばく線量評価についての講義を行いま

した。講義後は、高度被ばく医療線量評価棟や REMAT(緊急被ばく医療派遣チーム)の資機材を見学し、さらに緊急被ばく医療施設では放射線汚染検査と除染の実習を行いました。実習では参加者が防護服を着用し、講師の説明を受けながら、人形を用いて汚染の測定や傷口の除染について学びました。

まとめのディスカッションでは、参加者から「どのような備えが必要か」「これまでの経験からどのような課題を認識しているか」といった多くの質問が寄せられ、講師からは日本における緊急時対応の体制や教育訓練の重要性について、これまでの経験を踏まえた説明が行われました。最後に、参加者から感謝の言葉が述べられ、QSTへの記念品が贈呈されました。



実習の様子



参加者から内堀所長に記念品が贈られました

2 TOPICS

国立研究開発法人産業技術総合研究所との間で、連携及び協力に関する包括協定を締結



量子科学技術研究開発機構(QST)は、国立研究開発法人産業技術総合研究所(以下、産総研)と2026年1月30日(金)に、両機関の包括的な連携と協力を推進する協定を締結いたしました。本協定は、双方が有する研究開発力や人材、研究設備を相互に活用し、量子科学技術分野をはじめとする幅広い研究領域における協働を強化することで、我が国の学術・科

学技術の発展および産業競争力向上に寄与することを目的としています。

締結式には、産総研から石村和彦理事長、小原春彦副理事長、QSTから小安重夫理事長、伊藤久義理事が出席しました。式では協定の趣旨説明が行われたのち、両理事長から協定締結の意義や今後の連携強化に向けた強い期待が述べられました。また、署名後には記

念撮影が行われ、終始和やかな雰囲気の中、協定締結の節目が確認されました。

産総研とは従来、量子技術および量子生命科学の分野において研究協力を実施してまいりました。今回はそれに加えてフュージョンエネルギー分野など、多岐にわたる研究分野で新たな連携の可能性があるととして、包括協定の締結に至りました。また本協定を基盤として、研究協力だけでなく、次世代を担う研究者や技術者の育成にも力を注いでいく方針です。

QSTと産総研は既に双方の研究者がお互いの施設を見学し、具体的な研究協力について議論するなど、連携に向けて着実に歩みを進めています。今後も本協定を有効に活用し、互いの知見が交わることで、今後の技術革新にさらなる広がりを生み出せるよう取り組んでまいります。

詳細はこちら

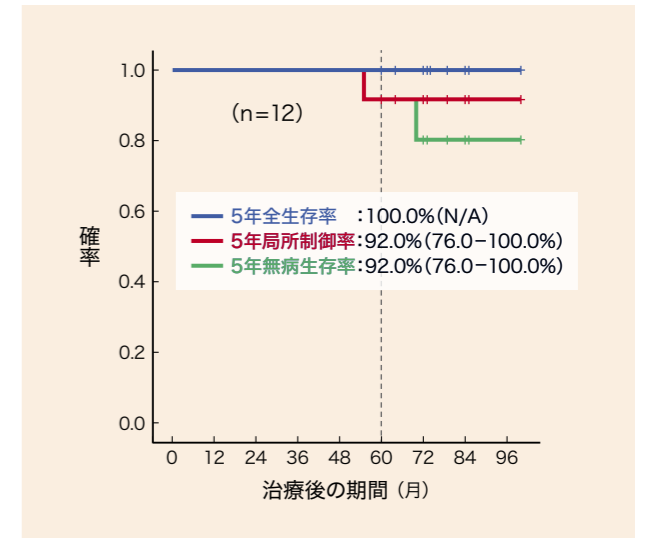


3 PRESS RELEASE

早期乳がんに対する切除を行わない重粒子線治療の有効性と有用性を確認

量子科学技術研究開発機構(QST)は、早期乳がんに対し「切除を行わない根治的重粒子線治療」の世界初の第II相試験を実施し、有効性と有用性を確認しました。対象は60歳以上のI期、ER陽性・HER2陰性、腫瘍2 cm以下で転移のない女性12例。1日1回15 Gy(RBE)を4日間、総線量60 Gy(RBE)照射しました。中央観察73カ月で、5年全生存率100%、局所制御率92%、無病生存率92%を達成しました。再発は1例(Ki-67高値)で手術を実施しました。重篤な急性毒性はなく、軽微な皮膚変化が6例、遅発的に肋骨骨折2例・乳腺炎関連疼痛3例を認めましたが、いずれも保存的に回復しました。整容性は再発例を除き良好に維持されました。これらは、手術非適応または手術を望まない患者に対し、QOLを保つ新たな根治選択肢となる可能性を示します。QSTは、0-I期全リスク群で標準補助療法を併用する試験や、50歳以上低リスク群を対象に1回照射で完結させる試験など、適応拡大と負担軽減に向けた研究を進めています。

詳細はこちら



重粒子線治療後の長期的治療効果
5年全生存率は100%、5年局所制御率および無病生存率はいずれも92%でした。

4 PRESS RELEASE

軟X線パルスレーザー光源による世界最高エネルギーでの電子状態の計測に成功

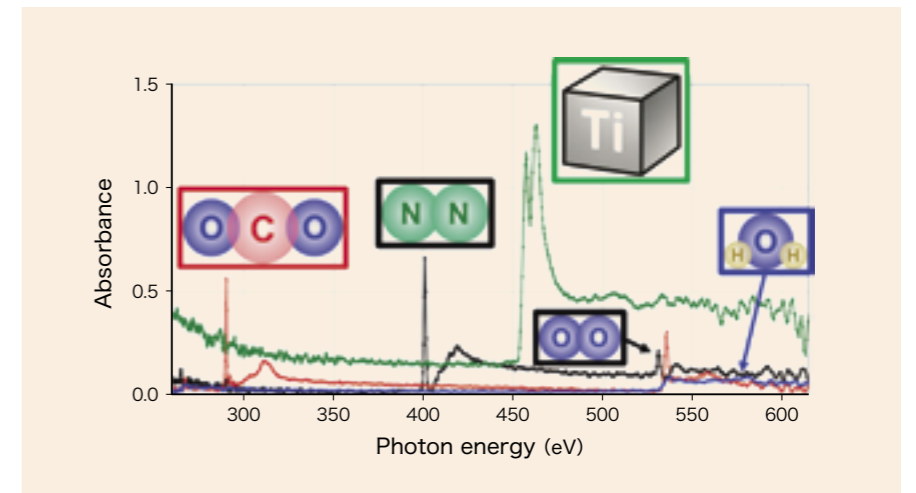
量子科学技術研究開発機構(QST)は、独自の高出力レーザーで“水の窓”全域をカバーする軟X線パルスレーザー光源を開発しました。“水の窓”とは、炭素は強く吸収する一方で水は通しやすいエネルギー帯(およそ280~540 eV)で、生体分子などをコントラストよく見分けられる重要な領域のことです。この光源により、酸素の内側の電子が反応する「酸素K端」(540 eV)で、電子の状態を見分ける計測に世界で初めて成功しました。従来のアト秒パルス光は極紫外域に限られ、酸素の観測は難しかったという壁を越えた成果です。

ポイントは、特殊な増幅器で作る強い赤外レーザーをガスに当て、より高いエネルギーの光を生み出す「高次高調波」を発生させたことです。これで“水の窓”全域を覆い、最大で約620 eVまで到達しました。その結果、炭素・窒素・酸素のK端やチタンL端近傍の、物質ごとの“指紋”に相当する微細な吸収の形(XANES)も読み取ることができます。

この技術により、光合成や光触媒、太陽電池などで、光を当てた直後に電子がどう動くのかを“コマ撮り”のように追う道が開けました。今後はサブフェムト〜アト秒級という極めて短いパルスの長さの実測や、放射光と役割分担し

ながら、中規模装置として多くの研究現場で使えるよう展開が期待されます。

詳細はこちら



水の窓領域における各物質のX線吸収端近傍構造の計測例

nano tech 2026に出展、
量子技術基盤・量子生命拠点の
研究成果や人材育成の取り組みについて紹介



2026年1月28日から30日まで東京ビッグサイトで開催された「nano tech 2026」において、QST(量子技術基盤・量子生命拠点^{*}、イノベーション戦略部)が出展しました。会期3日間でブースには延べ480名以上の来場者が立ち寄り、量子技術への高い関心を実感する機会となりました。

「nano tech 2026」はナノテクノロジー分野における世界最大級の総合展示会であり、本年度は「イノベーションで未来のビジネスを拓く」をテーマに、研究成果の事業化や社会実装を見据えた展示が行われました。

QSTはDeep Techゾーンにブースを設置し、ダイヤモンドNVセンターを用いた固体量子センサ、生体ナノ量子センシング、超偏極MRI、量子構造解析といった研究テーマについて、パネルおよび動画を用いて紹介しました。特に固体量子センサのデモ機実演には多くの来場者が足を止め、研究者との活発な意見交換が行われるなど、ブース内は終日活気に満ちた雰囲気となりました。

来場者からは、「量子センサの具体的な応用イメージが理解できた」「医療・ライフサイエンス分野での活用可能性に期

待している」などの声が寄せられ、企業関係者や研究機関との新たな連携の可能性についても複数の相談が寄せられました。また、SIP事業として推進している量子人材育成プログラムについても関心が高く、人材交流や共同研究に向けた具体的な議論の端緒となりました。

量子技術基盤・量子生命拠点としては今回で3回目の出展となりましたが、展示内容や見せ方を工夫することで、研究開発から社会実装までの一貫した取り組みを来場者に分かりやすく伝えることができました。一方で、より多様な産業分野への訴求や、デモ・体験型コンテンツの充実など、今後の展示に向けた課題も明確になりました。

今後、本展示をきっかけに生まれた連携ニーズを具体的な共同研究や社会実装へとつなげていきたいと考えています。

※量子技術基盤・量子生命拠点とは、量子技術の研究開発の推進を担う「量子技術イノベーション拠点(QIH)」として国から指定を受けたQSTが革新的な量子技術の創出とその応用技術開発を推進する「量子技術基盤」と「量子生命」の2つの拠点の総称です。

QST NEWS LETTERは本号をもって休刊することになりました。
2017年より長きにわたりご愛読いただき、心より感謝申し上げます。
今後はHPやパンフレット、SNSを通じて、QSTの研究活動等を発信しますので、引き続きどうぞよろしくお願いたします。

ご寄附のお願い



QSTの活動をご支援ください

《お問い合わせ先》
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
イノベーション戦略部研究協力推進課



オンラインでも
ご寄附いただけます



国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構
National Institutes for Quantum Science and Technology



<https://www.qst.go.jp>

■ Tel: 043-206-3023 (直通) ■ Email: kifu@qst.go.jp
■ URL: <https://www.qst.go.jp/site/about-qst/1311.html>

QST.Japan @QST_Japan qst_japan QST.Channel