



量子科学技術でつくる 私たちの未来

2021-2023

Contents

	タイトル	掲載日	著者	頁
	目次			1-3
	巻頭言			4
序	常識凌駕し世界変革	2021/05/20	美土路 昭一	5
	“地上の太陽”脱炭素貢献	2021/05/27	東島 智	6
	実験炉イーター「人類の夢」実験挑む	2021/06/03	正木 圭	7
	巨大超電導コイル、高精度制作	2021/06/10	中本 美緒	8
	史上最強のビーム加速に挑戦	2021/06/17	小島 有志	9
	太陽作る最強「電子レンジ」	2021/06/24	池田 亮介	10
	超高温プラズマ、レーザーで内部測定	2021/07/01	今澤 良太	11
	「ブランケット」熱エネ変換	2021/07/08	谷川 博康	12
	リチウム、海水・電池から回収	2021/07/15	星野 毅	13
	ベリリウム精製、省エネ・脱炭素技術開発	2021/07/29	中道 勝	14
	JT-60SA、原型炉の経済性高める	2021/08/05	鈴木 隆博	15
	JT-60SA、主要機器を高精度で設置	2021/08/12	松永 剛	16
	超伝導コイルを高精度配置	2021/08/19	濱田 一弥	17
	JT-60SA、高機能電源を高精度で制御	2021/09/02	島田 勝弘	18
	JT-60SA、プラズマ効率生成	2021/09/09	吉田 麻衣子	19
	AIで高速・高精度化	2021/09/16	成田 絵美	20
	原型炉実現へ急加速	2021/09/23	石井 康友	21
	原型炉設計の条件整う	2021/10/07	坂本 宜照	22
	イーターのプラズマをスパコンで事前予測	2021/10/14	松山 顕之	23
	高速中性子に耐える材料開発	2021/10/21	野澤 貴史	24
加速器で中性子環境を模擬	2021/10/28	近藤 恵太郎	25	
スピフォトニクスで実現	2021/11/04	大島 武	26	
2次元物質を磁気メモリーに応用	2021/11/11	境 誠司	27	
量子センシング、ダイヤモンドで超高感度	2021/11/18	大島 武	28	
リソグラフィ技術、電子回路を超微細化	2021/11/25	山本 洋揮	29	
レーザーでスマート加工	2021/12/02	乙部 智仁	30	
イオン注入、NVセンター精密配列	2021/12/09	鳴海 一雅	31	
陽電子で電子スピン分析	2021/12/16	河裾 厚男	32	
切らずに日帰りがん治療	2022/01/13	白井 敏之	33	
シンクロトロン加速器、小型化で広く普及	2022/01/20	水島 康太	34	
超電導回転ガントリー照射装置、患者の負担軽減	2022/01/27	岩田 佳之	35	
レーザー駆動でイオン加速	2022/02/03	榊 泰直	36	
正常臓器へのダメージ抑制、イオン組み合わせ	2022/02/10	稲庭 拓	37	
重粒子線がん治療、広く適用	2022/02/17	辻 比呂志	38	
重粒子線治療専用装置、治療以外にも利用	2022/03/03	下川 卓志	39	

フュージョンエネルギー

超省エネスマホ

量子メス

	タイトル	掲載日	著者	頁
	重粒子線治療の臨床加速	2022/03/10	小藤 昌志	40
	重粒子線で不整脈治療	2022/03/17	若月 優	41
	正常組織のがん化リスク検証	2022/03/24	今岡 達彦	42
	「薬」「放射線」兼ねる治療	2022/03/31	東 達也	43
	α線源、加速器で製造	2022/04/07	永津 弘太郎	44
	中皮腫、治療薬候補を開発	2022/04/14	辻 厚至	45
	放射性治療薬、低酸化腫瘍に高集積	2022/04/21	吉井 幸恵	46
	目印分子にアルファ線放出	2022/04/28	長谷川 純崇	47
	RI標識薬、がんに局所照射	2022/05/12	小平 聡	48
	希少疾患の根治治療に期待	2022/05/19	石岡 典子	49
	レーザーでハンマー代替	2022/05/26	錦野 将元	50
	高強度レーザーを屋外稼働	2022/06/02	岡田 大	51
	レーザー打音検査進化	2022/06/09	長谷川 登	52
	量子ビームで材料開発	2022/06/16	綿貫 徹	53
	FCV普及、コストがカギ	2022/06/23	八巻 徹也	54
	燃料電池、低コスト・高出力	2022/06/30	吉村 公男	55
	水素貯蔵を低コスト化	2022/07/07	齊藤 寛之	56
	鉄表面の磁気構造解明	2022/07/14	三井 隆也	57
	光電子分光を顕微化	2022/07/21	岩澤 英明	58
	植物、量子効果を巧みに利用	2022/07/28	河野 秀俊	59
	たんぱく質中の水素原子計測	2022/08/04	玉田 太郎	60
	エネ輸送たんぱく質を作製	2022/08/11	安達 基泰	61
	遺伝情報読み出し解明へ	2022/08/18	河野 秀俊	62
	軟X線分光技術を開発	2022/08/25	藤井 健太郎	63
	究極の細胞健康診断	2022/09/01	湯川 博	64
	ナノ量子センサーで細胞の異常検知	2022/09/08	五十嵐 龍治	65
	ナノ量子センサー、がん研究の道具に	2022/09/15	今岡 達彦	66
	「微小炎症」慢性化防ぐ	2022/09/22	村上 正晃	67
	脳疾患、ナノセンサーで知る	2022/09/29	田桑 弘之	68
	物理化学的パラメーター、細胞内で同時計測	2022/10/06	湯川 博	69
	異常たんぱく質蓄積検出	2022/10/13	樋口 真人	70
	ヘルメット型PET開発	2022/10/20	山谷 泰賀	71
	PET薬剤で指標可視化	2022/10/27	佐原 成彦	72
	脳画像で認知症AI診断	2022/11/03	遠藤 浩信	73
	画像・血液BMを一体化	2022/11/10	徳田 隆彦	74
	脳回路の働き点検・修理	2022/11/17	南本 敬史	75
	「前向き」な人生サポート	2022/11/24	山田 真希子	76
	PETで脳機能可視化	2022/12/01	高橋 美和子	77

量子メス

標的アイソトープ治療

全自動
インフラ検査

未来のクルマ

人工光合成でCO₂を削減

量子スマートセル

認知症の超早期診断



巻頭言



ならず、環境科学、生命科学、医療においても従来技術を越えた新しい展開を可能にすることで、人々の暮らしや社会の発展に役立つことが期待されています。

第2期中長期計画では、第1期中長期期間で確立した量子科学技術研究開発基盤をさらに強固にし、量子科学技術に関わる研究開発を通じて、新たな価値を創出・提供することで、経済・社会・環境が調和した持続可能な未来社会の実現に貢献することを目指します。研究成果の最大化を常に意識し、生産性革命や新産業創出などによる我が国の経済成長、がんや認知症の克服による健康長寿社会、カーボンニュートラルやサーキュラーエコノミー等によるグリーントランスフォーメーションの実現に貢献し、持続可能な未来社会の創造を目指します。

QST は、国の戦略、政策においても重要な役割を担っています。国の量子技術の実用化・産業化に向けた方針や実行計画を示した戦略である「量子技術イノベーション戦略」「量子未来産業創出戦略」において、「量子生命拠点」と「量子技術基盤拠点」に指定されており、量子技術と生命科学や医療を結びつけた量子生命技術の利用、量子デバイスの基幹材料である量子マテリアルの研究開発を推進しています。「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」においては、「フュージョンテクノロジー・イノベーション拠点」に指定され、フュージョンエネルギー発電の実現に向けた研究開発を行っています。放射線事故や原子力災害等への備えのために、QST は「基幹高度被ばく

医療支援センター」に指定され、被ばく医療や放射線影響に関する技術開発や人材育成に取り組んでいます。官民地域パートナーシップという新たな枠組みの下に設置中の3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu の整備も順調に進み、2024年4月からは運用を開始する予定です。我が国初の軟X線領域の高輝度放射光施設として、従来の物質構造に加え、電子状態やダイナミクス等の詳細な解析、物質表面の分析、磁性・スピンの解析などに威力を発揮することが期待され、革新的な材料やデバイスの創製・産業応用が始まります。医学・医療の分野では、重粒子線がん治療、標的アイソトープ治療、認知症の診断などに用いるイメージング技術などを通して健康長寿社会の実現に貢献することを目指します。

本冊子は、2021年5月より2023年8月まで、日刊工業新聞に掲載いただいた記事を取りまとめたものです。ぜひ、ご覧いただき、我々QSTの取組み、そして、さらには量子科学技術と社会との関わりについてご理解をいただければ幸いです。

最後に、QSTの取組み、成果の新聞掲載の機会を提供いただきご尽力をいただきました日刊工業新聞の関係者の皆様、執筆や編集に関わった関係者の皆様方に心からの感謝を申し上げます。

2023年12月

国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構

理事長 **小安 重夫**

タイトル	掲載日	著者	頁
「ナノテラス」24年度運用	2022/12/08	内海 渉	78
放射光蓄積リング整備	2022/12/15	西森 信行	79
高密度電子ビーム生成	2022/12/22	安積 隆夫	80
ビームラインで分光駆使	2023/01/12	高橋 正光	81
超高分解能RIXS開発	2023/01/19	宮脇 淳	82
軟X線ビームで新現象発見	2023/01/26	堀場 弘司	83
電子スピンの変動観測	2023/02/02	大坪 嘉之	84
ナノテラス、開かれた施設に	2023/02/09	萩原 雅之	85
放射線、健康リスクゼロに	2023/02/16	神田 玲子	86
放射性核種を高精度分析	2023/02/23	青野 辰雄	87
染色体異常をAI判定	2023/03/02	高島 良生	88
体内の放射性核種を検出	2023/03/09	谷 幸太郎	89
被ばく発がんリスク捉える	2023/03/16	飯塚 大輔	90
放射線皮膚障害の治療	2023/03/23	西條 広人	91
脳血管内治療、患者の眼守る	2023/03/30	盛武 敬	92
複合材で被ばく線量半減	2023/04/06	小平 聡	93
カロリー制限でがん予防	2023/04/13	森岡 孝満	94
量子技術支えるレーザー	2023/04/20	板倉 隆二	95
極短パルス軟X線光源開発	2023/04/27	石井 順久	96
究極の光スイッチ実現	2023/05/11	乙部 智仁	97
レーザーで生体反応観察	2023/05/18	坪内 雅明	98
究極のリソグラフィ技術	2023/05/25	佐々木 明	99
量子を支える光技術	2023/06/01	大島 武	100
軟X線レーザーで超微細加工	2023/06/08	石野 雅彦	101
身近な量子デバイス	2023/06/15	河内 哲哉	102
イオン操り量子コンピュータ	2023/06/22	鳴海 一雅	103
ダイヤモンドで情報素子	2023/06/29	小野田 忍	104
3次元材製に負けない製品	2023/07/06	山崎 雄一	105
室温で動作の単一光子源	2023/07/13	佐藤 真一郎	106
量子技術と企業つなぐ	2023/07/20	高草木 香織	107
量子センサー研究開発の中核	2023/07/27	秦野 歳久	108
量子生命科学の開拓者	2023/08/03	三枝 公美子	109
全身モデルで医療進化	2023/08/10	田口 光正	110
リチウム安定調達実現へ	2023/08/17	星野 毅	111
日本発次世代PET開発	2023/08/24	山谷 泰賀	112
製薬とPET薬剤の共創	2023/08/31	堀口 隆司	113

量子科学技術研究開発機構（以下、QST）は、2016年4月に、放射線医学総合研究所と日本原子力研究開発機構の一部機能を統合し発足、第1期中長期計画において、平野俊夫初代理事長のもと、「調和ある多様性の創造」を基本理念に掲げて量子科学技術分野の研究開発に取り組んできました。私は2023年4月、第2期中長期計画の開始とともに着任しました。社会からの期待に応えられるよう、QSTの新たな歴史を創りあげていく所存です。

現代は早急に解決が求められる地球規模の課題が山積する大変難しい時代です。これまでの人類の活動が海洋汚染や気候変動などを通じ、食糧・水・感染症・大災害などへの問題に繋がり、人類の未来に警鐘が鳴らされています。資源の枯渇や生物多様性の喪失など、地球の豊かさも失われつつあります。加えて、国際緊張や社会の分断など、人類が力を合わせてこれらの課題に取り組むことに対する障害も生じています。科学に携わる私たちには、持続可能な循環型地球社会を目指し、科学によって課題を解決する使命があります。

QSTが取り組む量子科学技術は、約百年前に誕生した量子力学を基盤としています。ナノサイズより小さい世界における量子の奇妙な振る舞いを理解し操作することで、物質の理解を進めて全く新しい物質を創製し、新規の測定を通してこれまで見ることができなかったものを観測することなどができます。量子科学技術によってニュートン力学では説明のできない世界を理解し、新規物質探索、情報通信、エネルギー等の分野のみ

物質の機能を可視化

被ばく防護と医療

光による量子制御

量子デバイスに
囲まれる生活

最先端研究を身近に届ける

量子科学技術で つくる未来

核融合発電

3

核融合発電の実現を目前、南フランスにイーター指して、世界の英知を結集し、開発を進めている。すでに30年以上にわたる核融合実験炉「 ITER」のプロジェクトは、人類が初めてその世界的にも類を見ない規模で進めるこのプロジェクトは、1985年に米ソ首脳で核融合に関する国際協力が話し合われたのがきっかけだ。

その後、米ソ（後に露）の4極で設計を進め、その後、韓中印の3極を加え、7極政府間で2006年にイーター協定を締結し、この国際約束の



30m、高さ30mであり、構成する機器も超巨大だ。対して1万分の1（数μm）の精度が要求され、担する機器の製作現場までの陸海・空の輸送、現地での組み立て、運転のいすれをとつても想像を越える困難さに直面する。

例えば、機器の製作では、良好なプラズマ閉じ込めのために10層を超える超巨大機器に提供し、イーターの製作・輸送・運転

製作・輸送・運転 世界が結集

し、精力的に活動中だ。今後の記事で紹介するが、日本は、イーターの心臓部である超伝導コイル9機、外部加熱機器、プラズマ計測機器、燃料処理系統、真空容器内機器とその保守装置など高い技術力が必須な製作の担当だ。また、優れた人材をイーター機構に派遣し、プロジェクト管理、組み立て作業の中核を担う。

量子科学技術研究開発機構(QST)は、日本のイーター実施機関として、これらに取り組みしている。かく言う筆者も、イーター組み立てを支援する一員として現地に滞在している。



量子科学技術研究開発機構(QST) 那珂核融合研究所 ITERプロジェクト部 ITER連携戦略グループリーダー 正木 圭

93年入所以来、核融合実験装置JT-60Uの容器内機器の研究開発、さらにその後継装置であるJT-60SAの設計と組み立てに関わってきた。現在、フランスにてイーターの建設に携わっている。

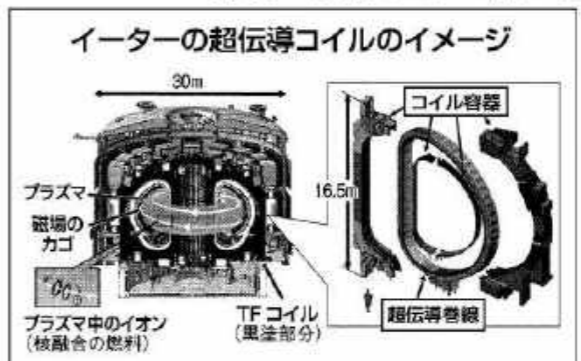
量子科学技術で つくる未来

核融合発電

4

核融合実験炉イーターは、長時間の運転でも消滅の高温プラズマを閉じ込め、電力は十分小さい。日める磁場を作るのが、ト本は、実験8基とスペアロイダル磁場(TF)の合計9基のTFコイルイールド。この主要機器はの調達が担当だ。

高さ16・5m、幅9m、プラズマを構成するイオンと電子を閉じ込める超伝導磁石で、6万カギは、TFコイルと8000カギの大電流を流すTFコイルとが作る磁場の力だ。放射状に並べたドーナツ状の空間に発生する磁場精度が不十分で磁場が11・8と強力だ。びつたと、プラズマの絶対温度4K(零下269度)で電気抵抗ゼロとなるニオブ・スズ超伝導線を超伝導巻線に用



内人として、サトウクシラ、最小でわずか0・4mmの強度な構造だ。厚板の製作精度が求められる。溶接変形が甚だしくその制御が課題であった。

さらに、要求精度実現のために量子科学技術研究開発機構(QST)が確立したのが、3次元測定機、レーザーラックカーで溶接中の変形をリアルタイムで計測しつつ、溶接箇所を変えたりあらかじめ変形させて溶接変形を抑制する手法だ。

また超伝導巻線をコイル容器内に一体化する際には、磁場の歪が0・0

溶接変形抑制/CAD解析

0.5%以下となる位置への超伝導巻線の組み立てが必要だ。そこでQSTが着目したのが、製作後の超伝導巻線とコイル容器のCADモデルを用いたコンピュータ解析だ。一体化作業中、モニターして1mm以下の精度で超伝導巻線の位置を調整し、その中心位置を直径2・6mmの内筒内に収めるという極めて高い要求精度を満足した。

すでに3基が現地南フランスに到着し、さらに完成した4基の海上輸送を開始しようとしており、QSTはまさに「地上の太陽」を実現する航海を安全に進める知見を得たのである。



量子科学技術研究開発機構(QST) 核融合エネルギー部門 ITERプロジェクト部 超伝導磁石開発グループ 主任技術員 中本 美緒

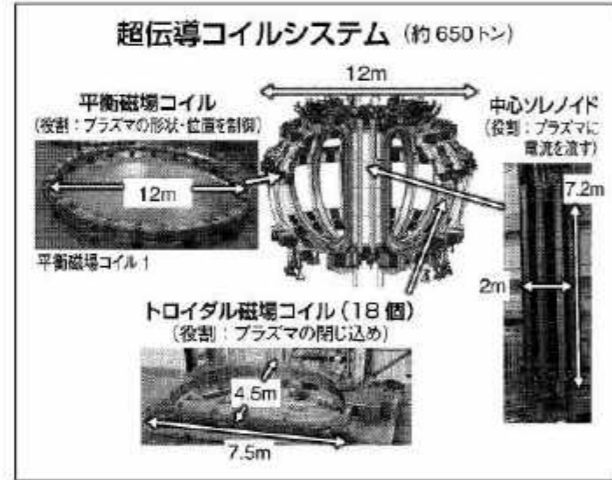
米カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)卒。超伝導磁石開発および製作管理に従事。

量子科学技術で つくる未来

核融合発電

13

1億度Cを超える高温... プラズマを100秒間閉じ込めることがJT-60...



超伝導コイル 高精度配置

超伝導コイルは、ドーナツ中心部に設置してプラズマに流す電流を制御する...

強力磁場で閉じ込め

気接統部は超伝導ではないが、コイル超伝導状態の維持には接統部での発熱を抑える必要がある...



量子科学技術研究開発機構 (QST) 那珂核融合研究所 トカマクシステム技術開発部 超伝導極低温機器開発グループ グループリーダー 濱田 一弥

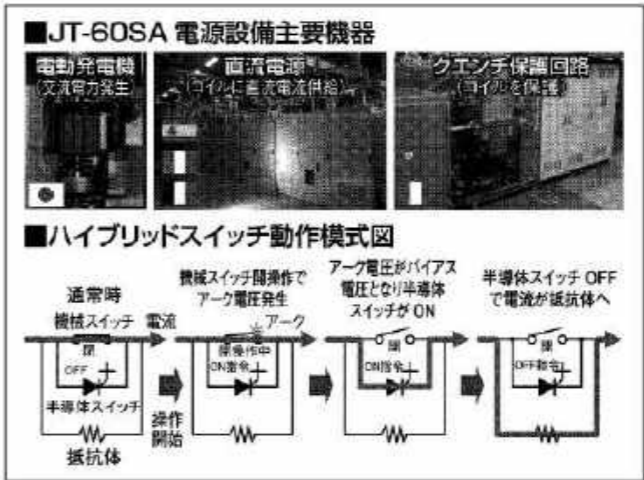
超伝導コイル、超伝導体、低温構造材料、ヘリウム冷凍システムの研究開発に従事。JT-60SAでは超伝導マグネットと冷凍機システムの運転を統括。

量子科学技術で つくる未来

核融合発電

14

核融合反応を起こす... プラズマを閉じ込める強磁場... 超伝導コイルに高電圧を印加し大電流を流す...



JT-60SA 高機能電源 高精度で制御

この開発には、2万ボルトの直流大電流を高速に遮断し、大電力用抵抗体に電流を移すという困難な技術課題があった...

高電圧・大電流・大電力を安全発生

導体スイッチの高速電流遮断性能と機械スイッチの低損失性を利用した「直流大電流遮断用ハイブリッドスイッチ」の考案...



量子科学技術研究開発機構 (QST) 核融合エネルギー部門 トカマクシステム技術開発部 JT-60SA電源・制御開発グループ 上席技術員 島田 勝弘

00年入所以来、核融合電源の研究開発に従事。旧装置JT-60の運転終了後は、欧州と協力してJT-60SA電源設備の設計・製作・試験などに従事。

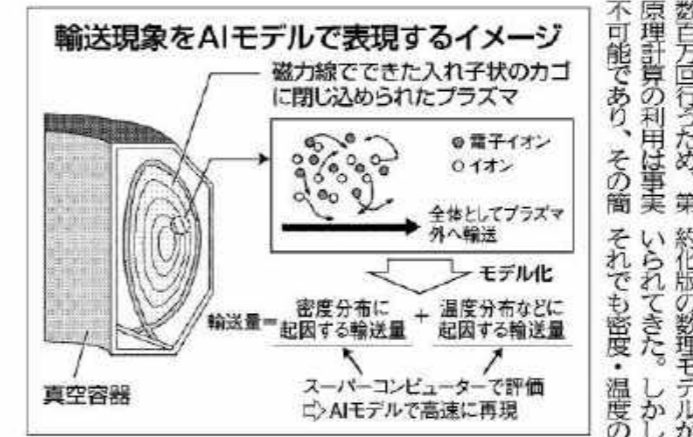
核融合炉が生み出すさまざまな物理現象と相対性理論はプラズマの相互作用のため、それ密度・温度で決まる物理現象を表す数値モデルを構築して矛盾のない性能評価に不可欠だ。...

量子科学技術でつくる未来

核融合発電



AIで高速・高精度化



数億回行っただけ、第1版の数値モデルが用いられていた。しかし、その間にも密度・温度の予測精度が向上し、...

プラズマ「輸送」計算コード開発

背景にある輸送の物理機構がわからない。そこで、密度分布に起因する項と温度分布に起因する項に分けて表式化した輸送モデルを構築し、...



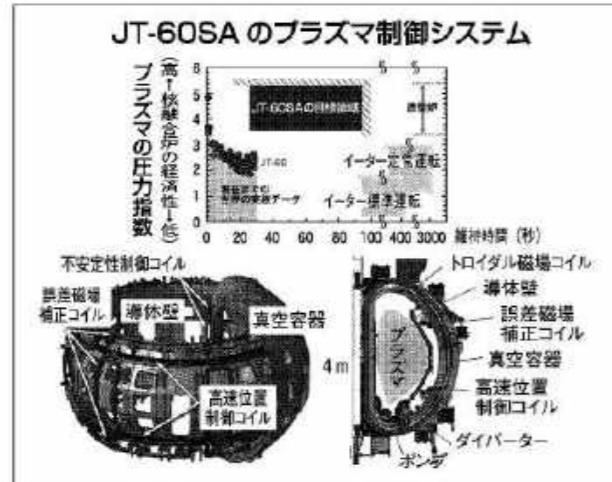
量子科学技術研究開発機構(QST) 那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部 先進プラズマモデリンググループ 主任研究員 成田 絵美

プラズマ中の輸送現象を対象とした数値モデルおよび他の物理現象の数値モデルと連成させた計算コードの開発に従事。

核融合エネルギーを生み出すプラズマ中を流れるみ出す源である数億度Cの超高温・高圧力プラズマ。JT-60SAは、外周約25cmのドーナツ型、体積約140立...

量子科学技術でつくる未来

核融合発電



JT-60SA プラズマ効率生成

の電流分布の強さとも深く関係するのだ。そこで波を入射・加熱したり、置いた導体壁や複数のコイルに電流を流したりする。...

超高温・高圧力で制御

できない重要な役割だ。この課題に立ち向かうため、前述の加熱システム、高精度の計測システム、プラズマ物理の理解に基づいた制御ロジックを統合したプラズマ制御システムを開発した。...

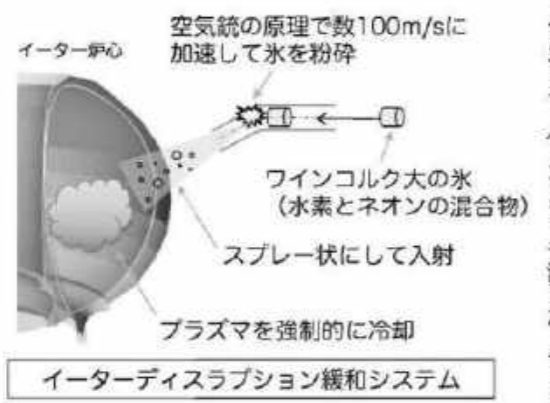
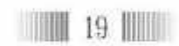


量子科学技術研究開発機構(QST) 那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部 先進プラズマ実験グループリーダー 吉田 麻衣子

JT-60や日欧の装置にてプラズマ輸送と制御の実験研究に従事。JT-60SAでは研究計画策定のとりまとめを行う。2021年より国際トカマク物理活動輸送研究トピカルグループ議長。

量子科学技術で つくる未来

核融合発電



イーターディスラプション緩和システム

イーターディスラプション緩和システム(量研機構提供)

この機器は、水素とネオンの混合ガスを氷点下260度C以下に冷却し

原型炉の早期実現貢献

作ったワインコルク大の水を粉碎、スプレー状にして入射し、プラズマを冷却する仕組みであり、現在、氷とその入射の最適条件を探る研究が進行中だ。

イーターの初プラズマ以降、このディスラプション発生時の緩和システムにより、装置損傷を回避し、50万Wの核融合出力の実証に貢献する。このように、スーパーコンピュータの進歩を背景とした、シミュレーションに基づくプラズマの予測や解析が極めて有効な検討手法となっており、イーターでの難問克服は、定常運転を行う原型炉の早期実現にも貢献する。



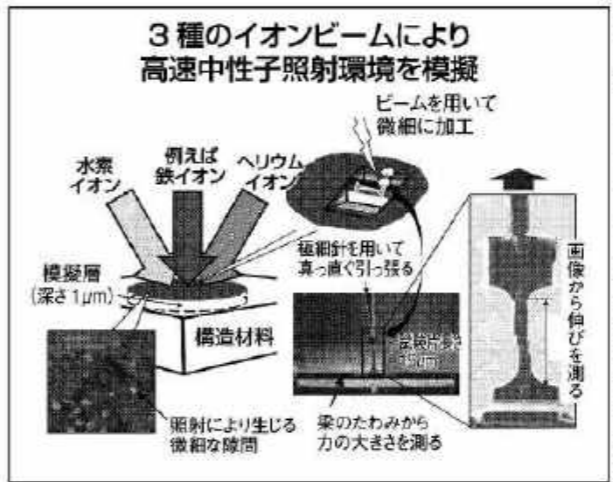
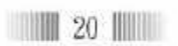
量子科学技術研究開発機構(QST) 六ヶ所研究所 核融合炉システム研究開発部 プラズマ理論シミュレーショングループ 主幹研究員

松山 顕之

専門は核融合プラズマの理論、データ解析、シミュレーション研究。イーター機構が組織したディスラプション緩和システム開発のタスクフォースの理論モデリング班副リーダーを務める。

量子科学技術で つくる未来

核融合発電



この克服のため、新たに試験片を微細に加工する、試験片を真っすぐ引張る、微小な梁のたわみから材料にかかる力を測定する、非接触で伸びを測定するなどのマイク

模擬環境下で影響測定

今後は本技術を取用して核融合中性子影響の発現条件を見極めるとともに、原子炉から構造体レベルまでの変形や破壊のメカニズムを解明し、原型炉環境に耐える材料の完成を目指す。



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子エネルギー部門 核融合炉材料研究開発部 核融合炉構造材料開発グループリーダー

野澤 貴史

核融合炉材料の破壊に関する照射効果研究に従事。最近材料試験技術の国際ガイドライン策定や核融合炉環境で材料を使うための新しいルール作りに関わる。博士(エネルギー科学)。

高速中性子耐える材料開発

プラズマ中で起る核融合反応で生じたエネルギー配列が乱される。同ギは、光速の約6分の1という高速中性子の形により材料中にヘリウムで取り出される。核融合や水素などの高温で気体炉の材料は、このような原子が多く発生中性子照射に対しては、材料に隙間ができた耐性を持つことが必要。これらの相乗効果に要だ。原型炉実現に向き、材料中には膨れ、中性子によって長い、脆くなるなどの性状半減期の放射性核種が生じることがあるため、原成しないように成分調整型炉実現には、その影響した高クロム耐熱鋼(低放射線中性子照射量の放射化フェライト鋼)と条件を知ることが必須呼ぶ)の開発が進む。

大量の中性子が材料中を通過する。これを調べるために、の原子に衝突すると、量子科学技術研究開発機構でヒリヤード球が次々構(QST) 高崎量子心と別の球を弾き飛ばして用研究所のイオン照射研

究施設(TARA)を素の3種類のイオンビームを使って、主要元素(鋼で)を同時に照射し、高速(例えば鉄)ヘリウム、水中性子照射の環境を模擬することが可能となった。

しかしこれらのイオンビームは材料の奥深くまで入り込まないため、影響は極表面(表面からわずか100万分の1程度)に限られ、厚みのある評価試験片を使って照射影響による強度変化を直接知ることは困難だった。

この克服のため、新たに試験片を微細に加工する、試験片を真っすぐ引張る、微小な梁のたわみから材料にかかる力を測定する、非接触で伸びを測定するなどのマイク

ロサイズの試験技術を開発した。材料を構成する結晶(原子が規則正しく配列した固体)の塊の中のマイクログサイズのサブ構造や、それらの境界などのわずかな模擬照射領域中における材料特性の変化を直接測定できる画期的な技術だ。これにより、イオンビーム照射施設を使って、中性子影響をさまざまな条件下で照射模擬し、材料特性を効率よく比較できる研究手法を確立できた。

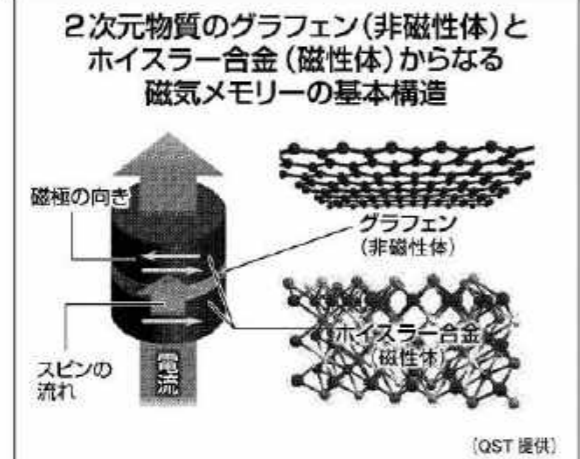
量子科学技術で つくる未来

超省エネ スマ

23

今日、IoT（モノの子が持つスピンが磁石とインターネット）の普及と同じように向きを持ち、に伴い身の周りで消費電力を流し、電流に乗って流れる性質をデジタルデータの量を流すスピンロニは年間数十%の勢いで増え続けている。増え続ける莫大な情報を記憶するために、磁石の性質を持つ磁性体は、より大容量で電力消費が少ないメモリの開発が必須となる。中でも、ハードディスクや磁気テープ（ナノ気ランダムアクセスメモリー（MRAM）などの磁性体と非磁性体を積層した磁性メモリー）は、電流が流れることで電流を流し、電流によって生じたスピンの不揮発性という特長からIoT社会を支える記憶デバイスとして期待されている。

磁性メモリーには、電流が流れることで電流が流れる方向によりスピンの向きが変化する。磁極の



異なるので、電気抵抗を測ることで書き込まれた情報が読み出せる。現在の磁気メモリーでは、磁性体に使われている非磁性体に使われているコバルト鉄合金はスピンの生成能力が低く、情報の書き込みや読み出しの効率化や低消費電力化が難しい。これに対して、量子科学技術研究開発機構（QST）では、磁性体と非磁性体の新材料として、スピンの生成能力が高いホイスラー合金とスピンの流れやすい2次元物質を磁気メモリーに応用する研究に取り組んでいる。2020年には、磁性を示すホイスラー合金と2次元物質のグラフェンの積層に世界で初めて成功し、書き込みや読み出しに要する電力を大幅に削減し、超低消費電力を実現する素子の開発を進めている。

磁気メモリーに2次元

超低消費電力化へ素子開発


物質を用いることは、スピンの流れやすいことが素子の低消費電力化に繋がること以外にも大きなメリットがある。次世代のIoT技術としてネットワークから端末までの情報処理を全て光ベークス・ネットワークが提唱されている。

この次世代技術は、光を生かした高速な情報処理が期待できるが、光は止められないので難点は記憶の保持だ。最近、2次元物質に光を照射するとスピンの向きが変化する。QSTでは、この性質を利用して光による書き込みが可能なおールフォトニクス・ネットワーク対応の磁気メモリー開発に着手している。

(木曜日掲載)

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部 プロジェクトリーダー **境 誠司**

2次元物質や新規磁性材料などのスピントロニクス材料の研究、および、放射光や原子ビームなどの量子ビームを用いた材料・デバイス評価技術の開発に従事。博士(工学)。



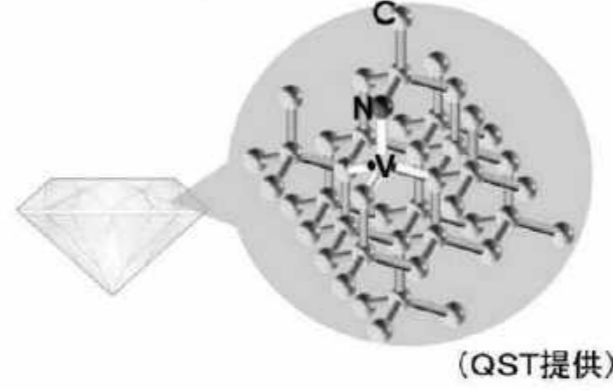
量子科学技術で つくる未来

超省エネ スマ

24

ダイヤモンド。その光ほど小さく、完全な結晶輝く姿は宝石の中の宝石の中に欠陥が存在することともいえ、多くの人を魅が重要なのだ。アスしている。このダイヤモンド、窒素-空孔(NV)センターと呼ばれるもので、本来は炭素原子があるべきところのダイヤモンドに窒素原子が存在し、その窒素原子の隣の炭素原子が欠損している。NV子だけで構成され、宝石センターは赤色に発光するの価値で言うと不純物を持つ特徴を持ち、たまたま含まれ、完全な結晶で、とつたNVからの発光でより大きなものが高価と も検出できる。つまり、される。一方、量子セン 大きさが100万分の1シングルの観点での価値観、材料という超微小なセンはまったく異なる。顕微 サイを使って100分の鏡で見なければいけない、1μmほどの大きさしか

ダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)センター



1をつくるには好都合だ。NVセンターは電子の状態により発光強度が変化する。発光強度を測定して磁場や温度の変化を正確にモニターする超高感度なセンサーが実現できる。


超微小領域でも超高感度にセンシングできるというところは、量子センシングを活用した省エネ・小型デバイスへの展開も可能となる。量子科学技術研究開発機構(QST)では、磁性材料メモリーの情報(磁化)の向きを量子センサーで高効率に読み出す新しい超低消費電力デバイスを開発し、開発を進めている。

(木曜日掲載)

NVセンター 結晶中欠陥の発光強度測定

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部 部長 **大島 武**

宇宙用の太陽電池や電子デバイスの放射線劣化・誤動作や、放射線を活用した材料の機能化、例えば、粒子線によるダイヤモンドや炭化ケイ素(SiC)中に量子ビットや量子センサー形成に関する研究に従事。博士(工学)。

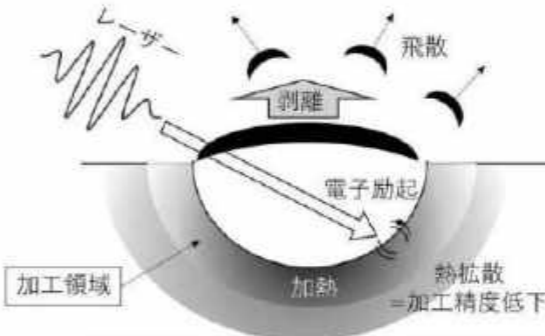


量子科学技術で つくる未来

超省エネ スマ

26

半導体の超微細加工の次世代レーザー加工技術光源としてEUV(極端)の開発を推進している。紫外線レーザーの開発 レーザー加工では、レが進むことを前倒し紹介し、レーザーによる加熱(物質)加工技術は、半導体以外の拡散と、急激な膨張によるさまざまな分野で新たなより弾き飛ばされ難い。な機能付与や少量多品種 飛散が起る(図参照)のスマート加工を可能に 精密なレーザー微細加工すると期待されている。を施すには、加工精度を量子科学技術研究開発機構 下げる熱拡散による融解構(QST)では、文部 が少ない非熱加工による科学省の光・量子飛躍プ リ、エネルギーを熱拡散プログラム(Q-LEAP) が起る前に同所的に短「先端レーザーイノベ 時間で与える必要があ ション拠点」光量子科学。 これを実現するために「最適化」などに参画し、レーザーによる物質



レーザー加工のメカニズム (QST提供)

計算できる世界唯一のプログラムである。相互作用・第一原理計算シミュレータ 例えは、非熱的な高精度加工の要項が望まれる。STが筑波 石炭ガラスによく利用される大学など 波長800nm(ナ共同で開発 ノは10億分の1)の近赤外レーザーを500ps(フ光と電子の エムトは1000兆分の運動を基礎 1)照射した時、加工深さが100nm以上にならない事を実験との誤差数%で再現するなど、さまざまな条件下で行うレーザー加工について、実際の試験を行わずとも、どのようなが起るかを精度良く予測することを可能にした。

新機能付与/少量多品種を製造

エネルギーと工程で行う条件の決定は単純ではなく、波長、レーザーパルス幅、偏光、表面状態など多くの変数の最適条件を探る必要がある、職人の経験による部分が大い。しかし、少量多品種製造ではさまざまな素材に狙った加工を施す必要があり実現は難しい。シミュレーションによる条件決定ができれば、開発の大幅な短縮につながる。

現在、SALMONで得られるエネルギー分布などを活用して、より大きな時間領域での現象を捉える理論や、物質の形状変化を再現するプログラムの開発を進めている。

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 関西光科学研究所 乙部 智仁 光子科学研究所

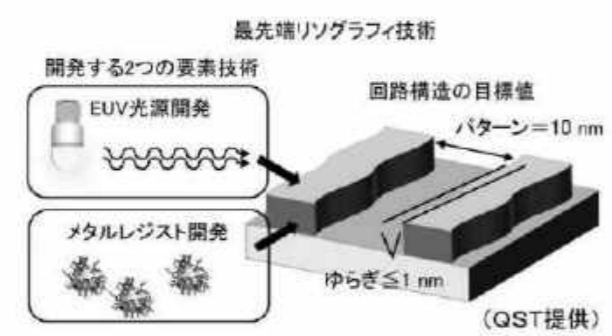
光と物質の超高速非線形相互作用の量子力学に基づく数値計算と解析、その総合的シミュレーションプログラムSALMONの開発・研究に従事。博士(理学)。

量子科学技術で つくる未来

超省エネ スマ

25

進化するスマートフォン 写した後、レジストを洗の機能に対応し、洗い流すなどの工程を行う、省エネを実現するに、パターンに合わせた、電子回路の性能を上げ、半導体表面をさまざまに加工することが可能であり、より微細化・集積化板にさまざまな電子回路した電子回路の設計・製を集積できる。作が必須となる。この電 リソグラフィ技術で子回路を作るために不可 は、光の波長が回路の微細化・集積化のカギを握る。量子科学技術研究開発機構(QST)では、呼ばれる材料(保護材) 2030年までに到来する半導体基板の表面に塗ると言われる10nm(ナ布)し、レジストに形成し、ノは10億分の1)未満のパターン越しに紫外光 パターンを1nm(ほぼ)などを露光し、パターン 原子10個分)のゆらぎ精度の形状を半導体基板に転 度で加工するといった極



限の超微細化に対応すべ の面からEUVリソグ ケタ短い波長13.5nmの極端紫外(Extreme Ultraviolet=EUV)がを推進して 光源として使われ始めている。光の波長 いる。QSTはEUV光が短いほ 源として、波長13.5nmど、より微 層のX線自由電子レザ 細なパター 5nmで発生させる波長13.5nmを正確に UVレーザーで発生させから、光源 活用のための研究と技 が進んでい 術開発を進めている。最 最先端 光源開発が進む一方、リソグラフ EUVリソグラフィに最イでは、従 適なレジスト材料の開発 来用いられ は遅れており、世界的な光の193 開発競争が繰り広げられ材料は紫外線との化学反

リソグラフィ技術 電子回路を超微細化

全電子・通信分野で省エネ

応だった。しかし、EUVでは材料と放射線の反応、つまり放射線物理・化学の領域だ。QSTが最も得意とする領域で、長年の知識と経験の積み上げがある。現在、メタルレジストと呼ばれるEUVに高感度な金属元素を含んだ物質をEUV用のレジストとして利用するための研究に取り組んでいる。

EUVリソグラフィが進展し、超微細化・集積化された高性能な電子回路を実現できれば、スマホのバッテリーの長寿命化は勿論、サーバーのエネルギー消費の大幅な削減など、電子・通信分野全での省エネへとつながるのだ。

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部 プロジェクト「EUV超微細加工研究」主幹研究員 山本 洋揮

EUVリソグラフィ用材料に関する研究に従事。QSTのプロジェクト「EUV超微細加工研究」のチーフとして次世代EUVリソグラフィレジスト材料の研究を推進する。QSTでのEUVレジスト研究成果が認められ、阪大のネットワーク型物質・デバイス共同研究拠点の滞在型COREラボに採択され、研究力の強化を図っている。博士(工学)。



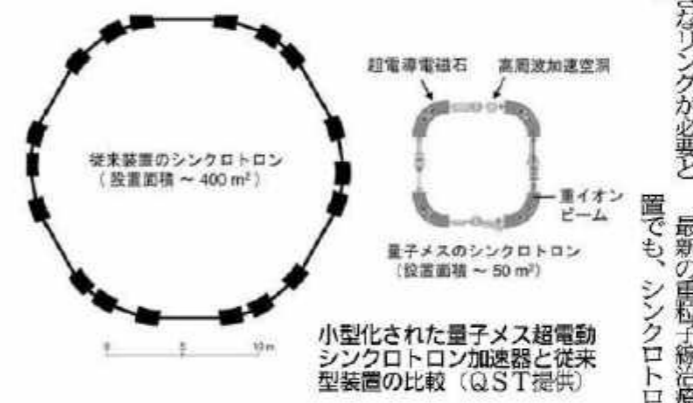
量子科学技術研究開発機構(QST)は、重粒子線がん治療の大きな利点を活かすために、秒速22万キロメートルの高速でがん細胞へ照射する重粒子線の高い殺傷効果と正常組織の損傷が少ないという特徴を活かし、「日帰りがん治療」の実現を目指している。この加速器は真空パイプをリング状に繋いだ構造を進めている。

重粒子線がん治療では、炭素イオンを体内深くまで到達させるために、高いエネルギー(速度)まで加速する必要がある。このための装置がシンクロトロン加速器である。例えば皮膚が30センチの深さにあるが、曲がりにくいため、半径



量子メス

シンクロトロン加速器 小型化で広く普及



最新の重粒子線治療装置でも、シンクロトロン加速器だけで400平方メートルの面積を占めており、この巨大さが重粒子線がん治療の普及を妨げる原因となっている。

量子メスではこの問題の根本的な解決を目指し、超電導コイルを用いた3・5テラの医療用高磁場電磁石を開発し、シンクロトロン加速器を治療室に設置できる50平方メートルまで小型化することを目標としてきた。超電導電磁石を用いる場合、シンクロトロン加速器の加速運転に伴う超電導電磁石の発熱の大きさが問題となるが、一般的な液体ヘリウム冷却設備は病

冷凍機のみで超電導維持

院での運用が困難なため、これに頼らない冷却が重要な課題であった。

そこで、2017年より産学が連携して、この問題を低減するために、シンクロトロンビーム軌道の最適化や、特殊な超電導電磁石の開発をおこなない、加速運転中も小型冷凍機のみで超電導状態を維持することに成功した。これにより、量子メス超電導シンクロトロンを実現できる見通しがついた。革新的な小型シンクロトロン加速器の実用化し、広く普及させることで、将来「日帰りがん治療」があたりまえとなり、量子メスが大きな社会的価値を生み出すことを期待している。

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子医科学研究所 物理工学部 主任研究員 **水島 康太**

粒子線治療技術の高度化に向けた加速器・ビームの制御システム開発に従事。現在は量子メス装置の開発に向けてシンクロトロンの設計に取り組む。博士(理学)。

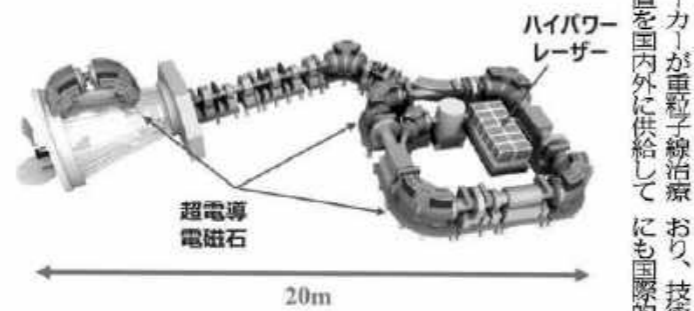
近年、がん治療は大きく体内のがんに照射して死んでいくが、依然減らせる放射線治療の1日本の疾病死1率で第1種である。炭素イオン位を占めている。さらには、がんを線量集中で、超高齢化社会に突入。さらに、通常の健康に生活できる健康寿命の延伸が重要な課題となっている。そのために、患者の身体的・社会的負担が少なく、治療後の生活の質が高いがん治療法が求められている。年。重粒子線がん治療

量子科学技術研究開発機構(QST)が取り組む重粒子線がん治療は、今では初期の肺がんを「日帰りがん治療」ができるまでに技術的進歩を遂げた。また、国内



量子メス

切らずに日帰りがん治療



メーカーが重粒子線治療装置を国内外に供給している。技術的にも商業的にも国際的優位性を持っている。

しかしながら、現在16年の発定より、中核の重粒子線治療装置は、超電導・レーザー技術などを用いて、治療室を半分ほどのサイズに収める革新があり、世界でも14施設しかない。日帰りの量子メス「量子メス」と名付けて開発してきた。

さらに、重粒子線がん治療の成り立ちとして、日帰りがん治療に向けた治療期間の短縮化のために、複数の重粒子線を組み合わせた照射や、免疫療法

「健康長寿社会」一翼担う

と組み合わせられた治療など、さまざまな臨床研究を実施しており、将来的には、次のシリーズで紹介する標的アイソトープ治療との組み合わせも視野に入れている。

QSTは量子メスによる「日帰りがん治療」を実現することで、「がん死ゼロ健康長寿社会」実現の一翼を担うとともに、量子メス開発に産学連携で取り組むことで、有力な輸出医療機器の育成を目標としている。

今後、量子メスに関する一連の連載のなかでは、こうした量子メスの装置開発と、重粒子線がん治療の臨床研究について紹介する。

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子医科学研究所 物理工学部 部長 **白井 敏之**

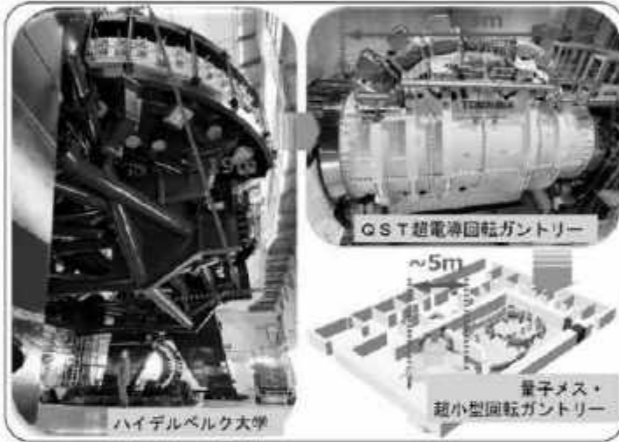
加速器・ビーム物理学の基礎的研究に従事した後に、QSTで重粒子線がん治療のための加速器・照射装置開発に参加。現在は量子メス開発のプロジェクトリーダーを務める。博士(理学)。

量子科学技術で つくる未来

量子メス

31

重粒子線がん治療は、X線や陽子線に比べ、炭素線が持つ高い生物学的効果と線量集中性を活かすことができる。副作用が小さく放射線抵抗性のがんに対して、重粒子線の被ばくを避け、も有効な治療法である。重要臓器の被ばくを避けるため、患者のからだを回転ガントリー照射装置で回転させるか傾けた不自装置を使い、患者に対して、照射する角度を360度任意の角度から、治療できる範囲に大きな制約を設けていた。この制約を解消するた



回転ガントリー照射装置の小型化の変遷 (QST提供)

超電導回旋ガントリー照射装置 患者の負担軽減
全長19m、重量600t、重いため、他の病院への導入は進まなかった。量子科学技術研究開発機構 (QST) は、液体ヘリウムを一切使用せずに超電導状態の維持が可能で、かつ炭素線の偏向と取束を同時に行える、機能統合型超電導磁石を開発することで、全長13m、重量300t程度と大幅に小型化した超電導回旋ガントリー照射装置の初号機を、世界で初めて15年に実用化し、QST病院に設置した。

精度・自由度・効率高める

重粒子線の線量集中性が高まり、患者に無理のない姿勢での照射が可能となったため、患者負担が軽減されると共に、治療の精度・自由度・効率が高まる。QSTは、超電導技術をさらに発展させ、最大発生磁場を高めると共に、励磁に伴う発熱を低減させるなど、超電導磁石の高性能化を図り、回旋ガントリーを全長5m程度にまで小型化する研究を進めている。超電導シンクロトロン加速器と超小型回旋ガントリー照射装置を組み合わせた量子メスは、高性能で大編に小型化した装置となることから、普及が一段と加速することを期待している。

量子科学技術研究開発機構 (QST) 量子生命・医学部門 量子医科学研究所 物理工学部 重粒子運転室 室長 岩田 佳之

自然界に存在しない不安定な原子核の核構造に関する研究に従事した後、QSTで重粒子線がん治療のための加速器・照射装置開発に従事。現在は重粒子運転室の室長を務める。博士(理学)。

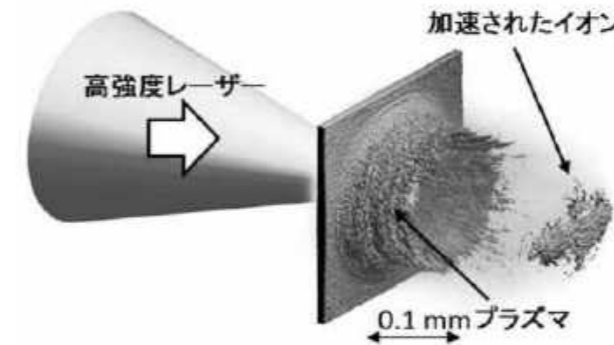


量子科学技術で つくる未来

量子メス

32

この連載で紹介している速くする必要があるが、放るように、炭素イオンを電が起すややくなるた用いた重粒子線がん治療、加速電圧は、平均しは、がん細胞の殺傷効果で1分あたり100万倍おおよび治療後の生活の質程度にとどまる。このたが高いがん治療法である、現状のシンクロトロン加速装置の長さは15m程度に治療の普及を妨げる大き、原理的にこれより小な原因となっている。型化することが難しい。一般的に加速器では、量子メスでは、超電導数百兆ワット (メガは100万) の電圧による電圧でなく、入射用加速器にもイオンを加速している。革新的小型化が求められ加速器を小型化するため、この実現の妨げには、この電圧を高めとなるのが、従来の電波で、短距離でイオンを加



レーザー駆動でイオン加速

「レーザー駆動イオン加速技術」この現象が米国で発見された2000年当初1秒幅という非常に短いから加速器時間幅のレーザーパルス小型化を、レンズを使って髪を毛よりも小さい直径のレークスルまで光を集め、1分あたり1核子 (10の20乗) の強度で炭素原子が注目され、国内で付いたターゲットに照射は量子科学の電磁場をイオンの加速機構 (Q) 電場に変換し、炭素イオンをシンクロン程度の距離で、光速の10%程度まで加速する手法である。これは、現行の加速器の加速電圧に比べて6ケタ程度高いものである。

革新的小型化の実現目指す

研究開発を開始した17年ごろのレーザー駆動イオン加速技術は基礎研究レベルだった。そこで、医療での実用化という高い目標を設定し、連続的に炭素イオンを安定供給するために、不純物が混ざり込まない材質と構造の炭素ターゲットを開発すること、高強度レーザーによる高純度な炭素イオンの安定的な加速の実証を急ピッチで進めてきた。実用化に向けた研究・開発が計画どおり進めば、26年ごろには、レーザー駆動イオン加速技術を用いた量子メス用入射器プロトタイプが完成する見通しである。

量子科学技術研究開発機構 (QST) 量子ビーム科学部門 光量子科学研究部 高強度レーザー科学研究グループ 上席研究員 神 泰直

SPring-8、J-PARCの加速器プロジェクトに15年間従事後、レーザー駆動イオン加速器の開発に参加。現在、レーザー駆動加速を用いた量子メス用入射器の開発を進めている。博士(情報学)。

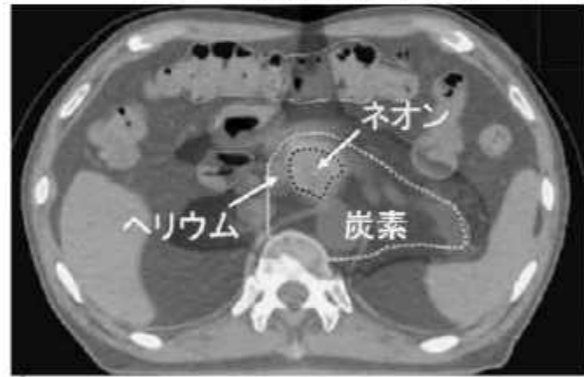


量子科学技術で つくる未来

量子メス

33

重粒子線がん治療で用いられる炭素イオンは、以上に高めるための技術が開発が望まれていた。エネルギーを放出し、細胞を傷つける。放射線の細胞殺傷効果が高いという特徴は、放射線の種類によらず、正常な臓器へのダメージを低く抑えながら、がんを集中的に治療できるという特徴がある。放射線の種類によらず、正常な臓器へのダメージを低く抑えながら、がんを集中的に治療できるという特徴がある。放射線の種類によらず、正常な臓器へのダメージを低く抑えながら、がんを集中的に治療できるという特徴がある。



膵臓がんに対するマルチイオン(ヘリウム、炭素、ネオン)治療の模式図 (QST提供)

正常臓器へのダメージ抑制
イオン組み合わせ

RBEは放射線の種類によって決まる調整不能な量であるため、従来の放射線治療は、重粒子線炭素イオンは、正常な臓器へのダメージが小さく、がんの殺傷効果が高い、放射線の種類によらず、正常な臓器へのダメージを低く抑えながら、がんを集中的に治療できるという特徴がある。放射線の種類によらず、正常な臓器へのダメージを低く抑えながら、がんを集中的に治療できるという特徴がある。

放射線量・RBE 最適化

炭素イオンを単独で照射するのではなく、オニウムイオンと組み合わせることで、RBEの異なる複数のイオンを組み合わせることで、がんの殺傷効果を高め、正常な臓器へのダメージを低く抑えながら、がんを集中的に治療できるという特徴がある。放射線の種類によらず、正常な臓器へのダメージを低く抑えながら、がんを集中的に治療できるという特徴がある。



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子医科学研究所 物理工学部 治療ビーム研究開発グループ グループリーダー 稲庭 拓

重粒子線治療の高度化に関わる治療計画装置、線量計算アルゴリズム、生物効果モデルの開発に従事。現在、マルチイオン治療の実現に向けた研究開発を主導している。博士(理学)。

量子科学技術で つくる未来

量子メス

34

重粒子線がん治療は、有効な治療方法が確立されてきたことにより、03年に先進医療として承認された。その後、さらに実用化が進んでいる。1994年に重粒子線がん治療施設が開設された。その後、さらに実用化が進んでいる。1994年に重粒子線がん治療施設が開設された。その後、さらに実用化が進んでいる。1994年に重粒子線がん治療施設が開設された。その後、さらに実用化が進んでいる。



重粒子線治療の適用 (☆…保険適用、◇…先進医療、▽…臨床試験) (QST提供)

重粒子線がん治療は、有効な治療方法が確立されてきたことにより、03年に先進医療として承認された。その後、さらに実用化が進んでいる。1994年に重粒子線がん治療施設が開設された。その後、さらに実用化が進んでいる。1994年に重粒子線がん治療施設が開設された。その後、さらに実用化が進んでいる。

安全性・効果・期間で優位性

重粒子線がん治療は、有効な治療方法が確立されてきたことにより、03年に先進医療として承認された。その後、さらに実用化が進んでいる。1994年に重粒子線がん治療施設が開設された。その後、さらに実用化が進んでいる。1994年に重粒子線がん治療施設が開設された。その後、さらに実用化が進んでいる。



量子科学技術研究開発機構(QST) QST病院 病院長 辻 比呂志

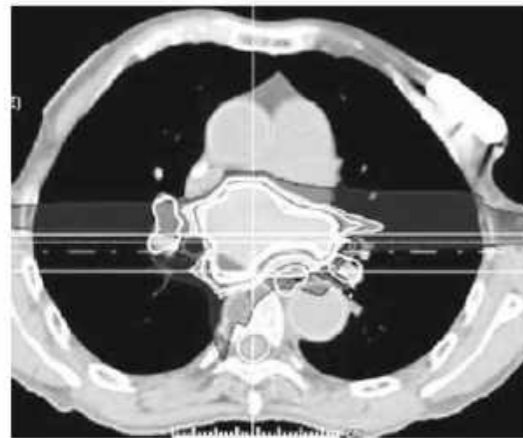
北大出身。一般放射線治療の経験の後、筑波大で陽子線治療に従事。97年より放射線医学総合研究所に赴任し、前立腺がんや眼球腫瘍を中心として重粒子線治療に携わっている。博士(医学)。

量子科学技術で つくる未来

量子メス

37

1994年に放射線医学総合研究所(現量子科学技術研究開発機構)QST)が重粒子線治療を...



心臓に対する重粒子線照射の線量分布図(QST提供)

重粒子線治療装置「HI-MAC」を用いた不整脈の実験により示した...

非がん疾患に適応広げる

治療の制約から垂直と水平の二方向からしか照射できなかったために治療が困難であった...



量子科学技術研究開発機構(QST) QST病院 治療診断部長

若月 優

群馬大出身。婦人科腫瘍に対する放射線治療、重粒子線治療を経験...

量子科学技術で つくる未来

量子メス

38

これまでの連載で、量子科学技術研究開発機構(現量子科学技術研究開発機構)が重粒子線治療を...

Table comparing radiation dose and cancer induction/kill power between normal tissue and cancer. Includes a diagram of irradiation.

がん化効果:相殺 治療効果:保持... がん化効果:相殺 治療効果:保持

重粒子線治療後の発生少なく

題にならない範囲であり、それ以外の年齢ではむしろ低いことがわかった...



量子科学技術研究開発機構(QST) 放射線医学研究所 放射線影響研究部

今岡 達彦

東大出身。放射線被ばくの生体への影響を研究している。国際放射線防護委員会タスクグループ111連絡委員...

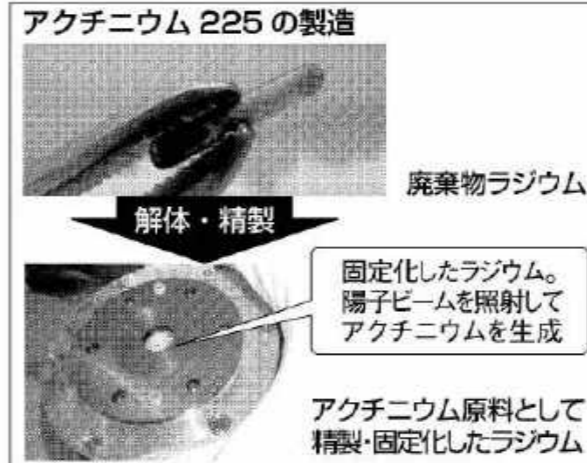
量子科学技術で つくる未来

標的アイントーブ治療

40

放射線科学の教科書に、核医学分野にも「量子科学」の章が追加され、量子科学の重要性が強調されている。量子科学は、放射線の生体に対する影響を制御する「量子科学」の重要性が強調されている。量子科学は、放射線の生体に対する影響を制御する「量子科学」の重要性が強調されている。

α線源 加速器で製造



従って、従来のヨウ素創薬技術を利用・発展させ、がんを撃つ「量子科学」の重要性が強調されている。量子科学は、放射線の生体に対する影響を制御する「量子科学」の重要性が強調されている。

毒を有用物質に変換・再生

良く、今後の創薬に大きな期待が集まっている。我々は、ラジウム226という物質を固定化して照射する技術を開発してアクチニウムを製造する方法を確立した。ラジウムは1960年代まで多くの産業利用がなされたが、放射線の危険性が指摘されて以降、世界的に産業用途を失い、放射性廃棄物として保管されている。我々が開発した技術は、ラジウムという廃棄物から医学的に価値のあるアクチニウムへ再生する方法と言える。社会的な毒を、科学によって有用な物質に変換・再生する技術は、新しい放射性治療薬開発と共に理解が得られるものと信じている。(木曜日掲載)

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命科学部門 量子医科学研究所 先進核医学基盤研究部 放射性核種製造グループ グループリーダー **永津 弘太郎**



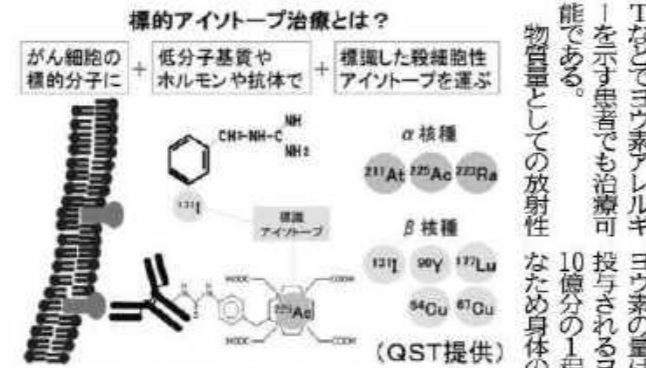
サイクロトロンを利用した放射性物質の製造研究を20年以上にわたって従事。核医学に利用する診断・治療用放射性物質のライブラリー構築に注力。薬剤師、博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

量子メス

39

量子科学技術研究開発機構(QST)が研究と外からのX線や重粒子線開発を進める。「薬」の照射による治療が苦手な「放射線治療」ということとする転移への治療に「ターゲット治療」というのも有効である。ターゲット治療(TRT)は、抗体などの「薬」部分に放射性核種(Radios)を結合させてがん細胞をターゲットにする。抗体はがん細胞の標的を特異的に認識する抗体、リガンドやホルモンなどを「薬」部分に結合させてがん細胞をターゲットにする。抗体はがん細胞の標的を特異的に認識する抗体、リガンドやホルモンなどを「薬」部分に結合させてがん細胞をターゲットにする。



「薬」「放射線」兼ねる治療

「薬」の照射による治療が苦手な「放射線治療」ということとする転移への治療に「ターゲット治療」というのも有効である。ターゲット治療(TRT)は、抗体などの「薬」部分に放射性核種(Radios)を結合させてがん細胞をターゲットにする。抗体はがん細胞の標的を特異的に認識する抗体、リガンドやホルモンなどを「薬」部分に結合させてがん細胞をターゲットにする。抗体はがん細胞の標的を特異的に認識する抗体、リガンドやホルモンなどを「薬」部分に結合させてがん細胞をターゲットにする。

副作用少なく 身体に優しい

この点でも、副作用の少ない「薬」の照射による治療が苦手な「放射線治療」ということとする転移への治療に「ターゲット治療」というのも有効である。ターゲット治療(TRT)は、抗体などの「薬」部分に放射性核種(Radios)を結合させてがん細胞をターゲットにする。抗体はがん細胞の標的を特異的に認識する抗体、リガンドやホルモンなどを「薬」部分に結合させてがん細胞をターゲットにする。抗体はがん細胞の標的を特異的に認識する抗体、リガンドやホルモンなどを「薬」部分に結合させてがん細胞をターゲットにする。



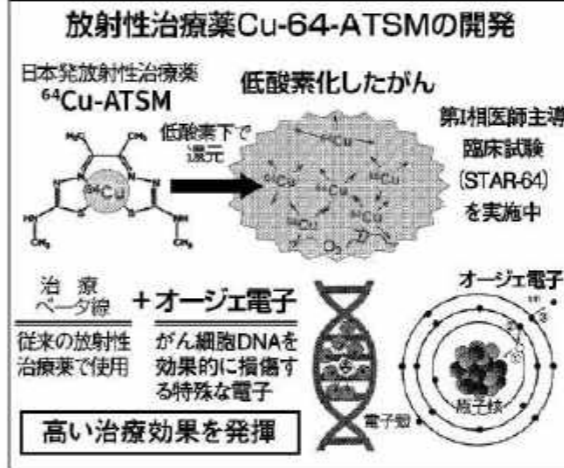
量子科学技術研究開発機構(QST) 量子医科学研究所 分子イメージング 診断治療研究部部長 **東 達也**

京大医卒。医師免許取得後、内科医を経て、核医学臨床研究に従事。米ミシガン大学を経て京大病院、滋賀県立総合病院研究所を経て、放射線医学総合研究所(現QST)に。博士(医学)。

量子科学技術で つくる未来

標的 アイソトープ 治療 42

現在、再発をきたしたを再発する放射性治療薬 悪性腫瘍に対して、有 Cu-64-ATSM の開 効な治療法は確立されて 発を行ってきた。本薬 いない。このため、新規は、腫瘍に限らず、組 治療法の開発が強く望ま 織浸透性が高く血流の乏 れている。従来の化学療 しい、他の低酸素化腫瘍 法や放射線治療が効きつ (がん) 内にも到達でき らない原因として、腫瘍の る性質を有する。こうし 中では腫瘍細胞が活発に たがん細胞内は酸素濃度 増殖し、血管が乏しくな が低いため、本薬は還元 増殖し、血管が乏しくな され、銅(Cu) の放射 することに加え、放射線治 性核種 Cu-64 を放出 療の際に必要な酸素が 乏し、これが低酸素化し たが腫瘍内部において濃度 が細胞内に蓄積するこ とでがん治療としての効 低下するためである。 くとがん治療としての効 果が高まる。 これに対し量子科学技 果が高まる。 この時、細胞内に高集 術研究開発機構(QST) 積した Cu-64 は、既存 は、低酸素化した腫瘍に 積した Cu-64 は、既存 高集積し、高い治療効果 放射性治療薬 (ヨウ素)



放射性治療薬 低酸素化腫瘍に高集積 130kVp X線照射による細胞への殺傷効果がより 90%以上が放出するβ-高いオージェ電子も放出 総だけではなく、高エネルギーで、がん細胞のデオキ リボ核酸(DNA) お がん細胞株移植モデルを 用いた非臨床試験で Cu-64-ATSM が悪性腫 瘍の増殖を効果的に抑 制し、生存率を改善する ことを明らかにしてき た。こうした成果から、 我々は再発性悪性腫瘍に 対する新治療薬として Cu-64-ATSM が有効 であると考え、現在本薬 のヒトでの安全性を明ら かにする第1相医師主導 臨床試験(STAR-64) を実施中である。 本臨床試験を実施する にあたり、我々は Cu-64-ATSM の製剤化、

がん細胞 効果的に殺傷

高品質な治療薬を製造す る体制の確立を行ってき た。本臨床試験は、QST と国立がん研究センタ ー中央病院と共同で開始 され、現在は治療薬製造 施設として両機関、さら に治療実施医療機関とし て国立がん研究センタ ー中央病院・神奈川県立が んセンターが参画し、多 施設体制で実施すること で、治療を加速してい る。本臨床試験は、治療 目的での Cu-64-ATSM を初めてヒトに投与 するファースト・イン・ ヒューマン試験である。 また、日本で開発され た放射性治療薬を国内で 製造・供給し実施する初 めての試験であり、早期 の実用化を目指してい る。 (木曜日掲載)

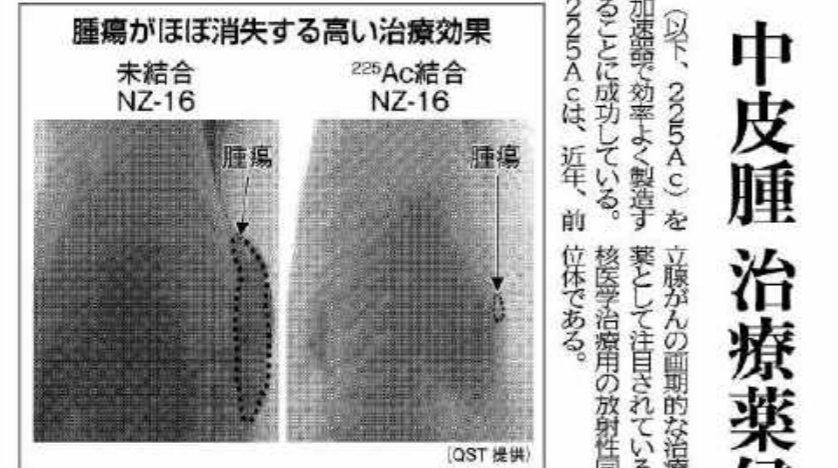
量子科学技術研究開発機構(QST) 分子 イメージング診断治療研究部 上席研究員 吉井 幸恵

難治性がんの放射性治療薬の研究開発に 15年以上従事しており、新薬をいち早く患 者の皆さんにお届けしたいと願っている。

量子科学技術で つくる未来

標的 アイソトープ 治療 41

量子科学技術研究開発機構(QST)は、中皮 どのっており、アスベスト 腫に対するアルファ(α)線放出核種を用 いた核医学治療薬候補の 伏期間が25-50年とされ ている。悪性中皮腫の発 生率は年間3000人、罹患 者数は年間30000人に 及ぶと予測されている。 中皮腫は、胸膜などに 診断される患者の7割以 上は進行がんであり、有 性腫瘍で、80-85%が胸 効な治療法がなく予後が 膜から発生する。中皮腫 悪いため、新たな治療法 の原因のほとんどは、ア が望まれている。 スベストは、放射線の飛ぶ 距離が細胞数個分、当 2005年のクボタシヨ 距離が細胞数個分、当 ツクを組織に大きな社会 たった細胞を殺傷する能 問題となった。日本国内 力が高いα線を放出する における中皮腫による死 核種アクチニウム225



中皮腫 治療薬候補を開発 (以下、225Ac)を 立腺がんの画期的な治療 加速で効率よく製造す 薬として注目されている ことに成功している。核医学治療用の放射性同 225Acは、近年、前 位体である。 この225Acを中皮 腫細胞だけに届けるこ とができれば、周囲の正常 細胞を傷つけることな く、がん細胞を殺傷する ことが可能である。そこ で、我々は、中皮腫細胞 の細胞表面に多く存在し ているポドプラニンとい うたんぱく質に結合する 抗体NZ-16(以下、 「NZ-16」という) に、225Acを結合し たα線核医学治療薬候補 として225Ac結合NZ-16を開発した。ポド プラニンは中皮腫の中 にも悪性度の高い肉腫類に も高発現しているたんぱ く質で治療的として有

α線核医学の副作用減

望である。 225Ac結合NZ-16を、中皮腫のモデルマ ウスを1回投与したとこ ろ、腫瘍サイズを縮小さ せ、ほぼ消失する効果が あることを確認した。ま た、生存期間を延長する ことも確認した。一方 で、副作用の指標となる 体重減少や病理所見は認 められなかった。これら の研究成果から、悪性中 皮腫に対して、225Ac 結合NZ-16によるα 線核医学治療が副作用の 少ない効果的な治療法と なることが期待される。 現在、臨床応用に向けて 関係機関と協力して準備 を進めており、3年後の 臨床試験の実施を目指し ている。 (木曜日掲載)

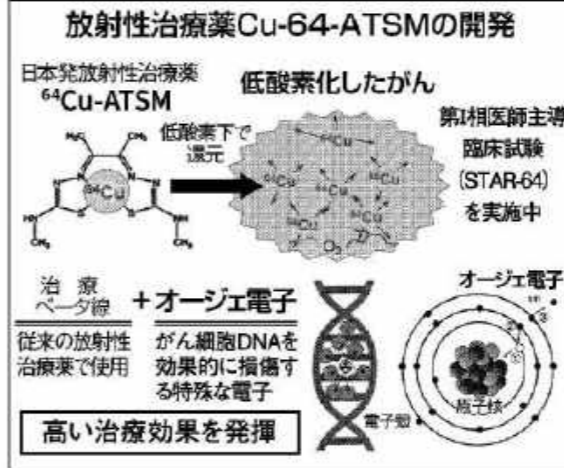
量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子医科学研究部 分子イメージング診断治療研究部 核医学 基礎研究グループ グループリーダー 辻 厚至

非密封放射性同位元素を利用した核医学の診断・治療 の開発研究に従事している。がん治療法のひとつ、抗体 を利用した放射免疫療法の開発研究に注力している。

量子科学技術で つくる未来

標的 アイソトープ 治療 42

現在、再発をきたしたを再発する放射性治療薬 悪性腫瘍に対して、有 Cu-64-ATSM の開 効な治療法は確立されて 発を行ってきた。本薬 いない。このため、新規は、腫瘍に限らず、組 治療法の開発が強く望ま 織浸透性が高く血流の乏 れている。従来の化学療 しい、他の低酸素化腫瘍 法や放射線治療が効きつ (がん) 内にも到達でき らない原因として、腫瘍の る性質を有する。こうし 中では腫瘍細胞が活発に たがん細胞内は酸素濃度 増殖し、血管が乏しくな が低いため、本薬は還元 増殖し、血管が乏しくな され、銅(Cu) の放射 することに加え、放射線治 性核種 Cu-64 を放出 療の際に必要な酸素が 乏し、これが低酸素化し たが腫瘍内部において濃度 が細胞内に蓄積するこ とでがん治療としての効 低下するためである。 くとがん治療としての効 果が高まる。 これに対し量子科学技 果が高まる。 この時、細胞内に高集 術研究開発機構(QST) 積した Cu-64 は、既存 は、低酸素化した腫瘍に 積した Cu-64 は、既存 高集積し、高い治療効果 放射性治療薬 (ヨウ素)



放射性治療薬 低酸素化腫瘍に高集積 130kVp X線照射による細胞への殺傷効果がより 90%以上が放出するβ-高いオージェ電子も放出 総だけではなく、高エネルギーで、がん細胞のデオキ リボ核酸(DNA) お がん細胞株移植モデルを 用いた非臨床試験で Cu-64-ATSM が悪性腫 瘍の増殖を効果的に抑 制し、生存率を改善する ことを明らかにしてき た。こうした成果から、 我々は再発性悪性腫瘍に 対する新治療薬として Cu-64-ATSM が有効 であると考え、現在本薬 のヒトでの安全性を明ら かにする第1相医師主導 臨床試験(STAR-64) を実施中である。 本臨床試験を実施する にあたり、我々は Cu-64-ATSM の製剤化、

がん細胞 効果的に殺傷

高品質な治療薬を製造す る体制の確立を行ってき た。本臨床試験は、QST と国立がん研究センタ ー中央病院と共同で開始 され、現在は治療薬製造 施設として両機関、さら に治療実施医療機関とし て国立がん研究センタ ー中央病院・神奈川県立が んセンターが参画し、多 施設体制で実施すること で、治療を加速してい る。本臨床試験は、治療 目的での Cu-64-ATSM を初めてヒトに投与 するファースト・イン・ ヒューマン試験である。 また、日本で開発され た放射性治療薬を国内で 製造・供給し実施する初 めての試験であり、早期 の実用化を目指してい る。 (木曜日掲載)

量子科学技術研究開発機構(QST) 分子 イメージング診断治療研究部 上席研究員 吉井 幸恵

難治性がんの放射性治療薬の研究開発に 15年以上従事しており、新薬をいち早く患 者の皆さんにお届けしたいと願っている。

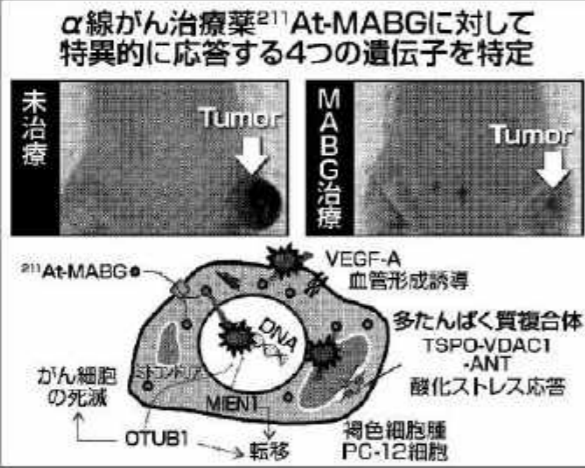
量子科学技術で つくる未来

標的アイントーブ治療

45

がんは放射線をあて、薬の体内循環により、細胞の増殖を抑えたり、在するがんの照射が可能死滅させたりする治療法であり、近年導入された放射線治療という。放アルファ線放出薬剤では放射線治療という体外に溜まっている転移性から放射線をあてる外照のがん細胞を完全に死滅射を指すことが多いが、させるような大きな効果標的アイントーブ治療も期待できる。

は、放射線を出す薬を投 副腎皮質由来の神経内与し、体内のがんに放射線腫瘍の一つ、悪性褐色細胞腫を照射する治療である。既存の治療法では根治で使う薬は、放射線を放 量子科学技術研究開発つ部位(放射性同位体) 量子科学技術研究開発とがん細胞に結合する部 機構(QST)は、この位下ラックテリバリ) 悪性褐色細胞腫の治療の構成されることから、ため、放射線の中でも細



希少疾患の根治治療に期待

胸殺傷能力の高いアルファ線(α線)を放つアスタチン211(211At)にド ラッグテリバリ)機能を

備えた211At-標識メ タアスタチンベンジルグア ニジン(MABG)を開 発し、悪性褐色細胞腫に 対する有効性を明らかに した。

その効果は、悪性褐色 細胞腫のモデルマウスに おいて腫瘍サイズを大幅 に縮小(図)するとともに、約1カ月以内に、細胞の増殖を抑制するに至った。安全性についても、想定外の副作用が見られなかったことから、現在、臨床応用の早期実現に向けた準備が関係機関により進められている。

続いて、我々は、M A

MABG治療効果 最大化

BCによる治療効果の最大化を目指す、患者間で治療効果が異なるという課題解決に向け、研究を開始している。治療の有効性を事前に見極め、治療効果を最大化するためには、MABGに対するがんの応答を分子レベルで調べ、治療効果誘導のカギとなる分子を特定する必要はある。これまでも、MABG処置に対して特異的に応答するがん細胞の4遺伝子を発見(図)しており、これらの遺伝子の応答を手掛かりに、引き続き、がん治療効果の予測と向上に役立つ指標(バイオマーカー)の特定を進め、MABGによる治療効果の最大化を目指す。

(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部 部長 石岡 典子

がんの診断・治療に役立つ放射性同位体の製造 および薬剤化に関する研究に従事。博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

全自動インフラ検査

46

トンネルや橋などの現 戦的イノベーション創 代社会を支えるインフラ 造プログラム(SIP) 内部の健全性の点検は、 の「インフラ維持管理・ 熟練点検技術者がハンマ 更新・メンテナンス技 術を用いた点検・モニタ ーで壁面を叩き、その音 響を用いた点検・モニタ ーの音を聞く打音検査に よって行われている。シ リング・診断技術の研究 かし、戦後、急激に整備 開発を、理化学研究所、 が進んだこれらのインフ ラは、50年が経過した今 日、高齢化を一斉に迎 実態に近づいた。具体的 に、構造体の劣化に点検 は、ひびや剥離などの損 傷を検査員が高所作業車 り、事故発生リスクの拡 大が予測される。

こうした社会背景を踏 目的として、遠隔で計測 開発機構(QST)では、 した画像や振動などのデ



レーザーでハンマー代替

今回開発 したレーザ ー打音検査 装置は、高 出力レーザ ーを駆使し、 壁面に打音 検査を行う。 さらに、この 装置は、ハン マーの打撃を代 替する。ハン マーの打撃は、 壁面に打音 検査を行う。 さらに、この 装置は、ハン マーの打撃を代 替する。ハン マーの打撃は、 壁面に打音 検査を行う。 さらに、この 装置は、ハン マーの打撃を代 替する。

打音検査を効率化

確立するための装置の性能評価や効率的な点検手法の研究や実証と、モブ ility)技術として「壊れ ない」装置の開発を進め、 連携を取り組んでいる。 また、現状では総重量が 1.5トンを超える装置を マルチコプターなどに搭 載するための小型・軽量 化にも取り組んでおり、 今後、検査場所を選ばな い打音検査に幅広く使 用される技術となることを 期待している。

本シリーズでは、高出 力レーザーの研究の応用と して、「現場」で使える レーザー装置の開発や、 それを使った屋外での実 証試験に向けたレーザー 打音試験について紹介す る。

(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 研究企画部 研究統括 錦野 将元

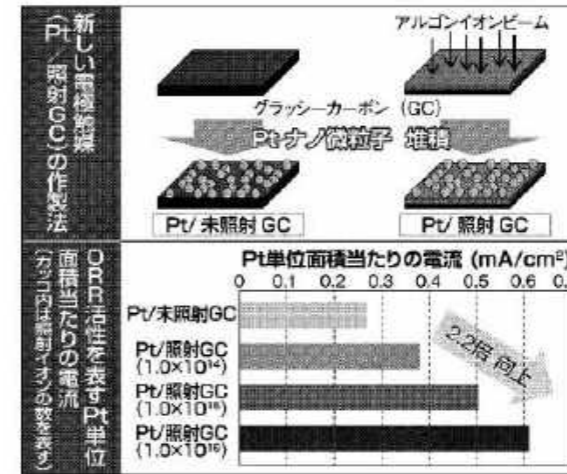
レーザー核融合やX線レーザーなどの高出力レーザー・プラズマ 応用研究に従事後、レーザー加工、レーザー打音や量子メス用 入射器などの社会実装に向けた研究開発に参加。博士(工学)。

水素エネルギーはカー性能を2倍以上向上させ、ポニーニートラル実現のことに成功した。切り札の一つだ。水素を、現在のORR触媒に使う燃料電池(FCEV)は、Pt微粒子を炭素材の普及拡大には、搭載するに保持させた「Pt微粒子高分子形燃料電池」が大量のPtを削減し、コスト低減が必要だ。Ptの削減が不可欠であり、そのコストは依然として高力なPtを削減するのがPEFC、FCEVの市場普及が酸素極の酸素還元反応にかなわないうまい。Pt(ORR)触媒という材料使用量を削減してコスト削減。量子科学技術研究を低減するには、ORR開発機構(QST)では、活性と耐久性の向上が技術イオンビームの一つである。術課題とされている。炭素材料に貴金属であるPtと炭素材料との界面で白金(Pt)を保持させ、現するPt-炭素間の相新手法を開発し、その相互作用に着目し、炭素材

量子科学技術で つくる未来

未来のクルマ

49



料側からPt微粒子の電子構造を制御すれば、この課題を克服できると考えた。そこでQSTのイオン照射研究施設(TI)でPt微粒子を形成させるという新しい触媒作製法を試みた。欠陥構造がPt-炭素相互作用を強めるのなら、その量を増やすことでORR活性は向上するかもしれない。長年の蓄積がある照射効果の知見を基に、照射するイオン数を調整し、欠陥構造の量を調整させた。この予想は的中した。照射イオン数、すなわち欠陥構造の増加に伴い、ORR活性は向上し、欠陥構造を導入していない従来触媒と比較して約2・2倍にまで高めること

ORR触媒 白金使用減

ができた。放射光実験と理論計算により、高活性化のメカニズムがPt微粒子から炭素材料への電荷移動に伴う界面相互作用に起因したPtの酸化抑制にあることも突き止めた。現在、並行して耐久性に関する研究も進んでおり、ORR活性×耐久性の指標で10倍の性能向上を目指している。同じ炭素からなるダイヤモンドでは、原子空孔のような欠陥構造が量子センサーに活用されている。欠陥構造の持つ局在性の効果は、Ptを全く含まないORR触媒の開発にも活用できるのでは、という期待を抱かせる。

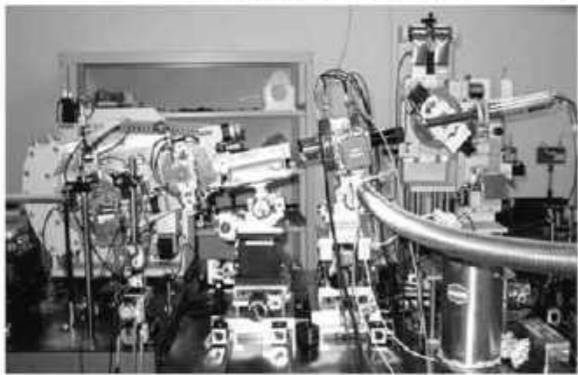
量子科学技術研究開発機構(QST)量子ビーム科学部門 研究企画部長(併任)高崎量子応用研究所 プロジェクト「先進触媒研究」リーダー **八巻 徹也**
専門分野は量子ビーム材料科学。ガンマ線、電子線、イオンビーム、中性子線、放射光X線などを用いて、電極触媒から高分子電解質膜まで広く環境・エネルギー材料の研究に従事。博士(工学)。

未来のクルマでは、地とを養い、従来必要と球環境を守るために脱炭素化をさまざまな要素がわなない新材料の実現の扉に進めることが必要だ。を開いた。この発見は、そのため、量子科学技術 量子ビームの一つである研究開発機構(QST)で 放射光X線という強力な水素貯蔵材料や燃料電池触媒など、さまざまな装置・機器の要素となる「材料」の開発を、「量子ビーム」を用いたユニークな方法で行っている。Pt微粒子などの照射による最近、水素貯蔵材料探り、材料の機能を向上させるには、資源豊富な金をPtの代替も行うている。Ptでもかつかつ水素化金属の燃料電池触媒の省白金化代表でもあるアルミニウムに向けて、白金自体ではなく鉄を組み合わせた合金で水素が蓄えられることを目指している。

量子科学技術で つくる未来

未来のクルマ

49



新発想のもと、イオンビーム照射で炭素材料に欠陥を制御しながら導入する。Pt/照射GCの作製法。Pt/未照射GCとPt/照射GCの比較。Pt単位面積当たりの電流(mA/cm²)のグラフ。Pt/未照射GC(1.0x10⁻⁴), Pt/照射GC(1.0x10⁻⁴), Pt/照射GC(1.0x10⁻⁴), Pt/照射GC(1.0x10⁻⁴)。2.2倍向上。放射光X線を用いた顕微鏡的観察技術の開発と、それを用いた物質中のナノメートルの世界の現象解明の研究に従事。博士(理学)。

量子ビームで材料開発

レアメタル不要 機能向上

期待されるアンニオン型の燃料電池では、電解質膜の劣化が課題だが、この技術を活用して高耐久性な燃料電池を開発することを目指す。未来のクルマでは、自動車など今後のパリアフリー社会に役立つスマート化も重要な役割を担う。そこで必要となる高度な制御・情報処理のために、さまざまな電子・磁気デバイス開発が行われている。QSTでは、それらに役立つ技術として、先端デバイス機能の顕微鏡的観察技術を開発している。この連載では、以降、これらの話題を詳しく紹介していく。(木曜日に掲載)

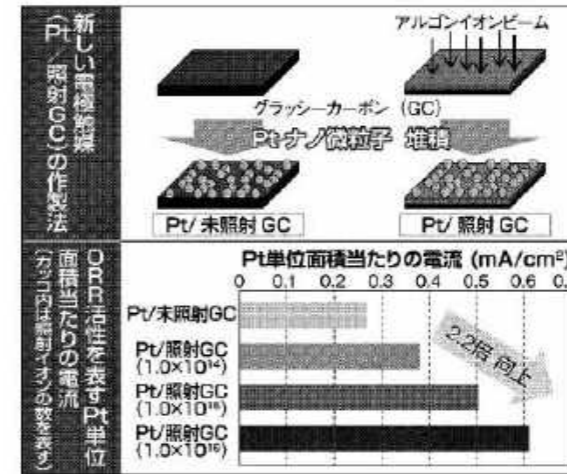
量子科学技術研究開発機構(QST)量子ビーム科学部門 関西光科学研究所 放射光科学研究センター長 **綿貫 徹**
放射光X線を用いた非破壊の顕微鏡的観察技術の開発と、それを用いた物質中のナノメートルの世界の現象解明の研究に従事。博士(理学)。

水素エネルギーはカー性能を2倍以上向上させ、ポニーニートラル実現のことに成功した。切り札の一つだ。水素を、現在のORR触媒に使う燃料電池(FCEV)は、Pt微粒子を炭素材の普及拡大には、搭載するに保持させた「Pt微粒子高分子形燃料電池」が大量のPtを削減し、コスト低減が必要だ。Ptの削減が不可欠であり、そのコストは依然として高力なPtを削減するのがPEFC、FCEVの市場普及が酸素極の酸素還元反応にかなわないうまい。Pt(ORR)触媒という材料使用量を削減してコスト削減。量子科学技術研究を低減するには、ORR開発機構(QST)では、活性と耐久性の向上が技術イオンビームの一つである。術課題とされている。炭素材料に貴金属であるPtと炭素材料との界面で白金(Pt)を保持させ、現するPt-炭素間の相新手法を開発し、その相互作用に着目し、炭素材

量子科学技術で つくる未来

未来のクルマ

50



料側からPt微粒子の電子構造を制御すれば、この課題を克服できると考えた。そこでQSTのイオン照射研究施設(TI)でPt微粒子を形成させるという新しい触媒作製法を試みた。欠陥構造がPt-炭素相互作用を強めるのなら、その量を増やすことでORR活性は向上するかもしれない。長年の蓄積がある照射効果の知見を基に、照射するイオン数を調整し、欠陥構造の量を調整させた。この予想は的中した。照射イオン数、すなわち欠陥構造の増加に伴い、ORR活性は向上し、欠陥構造を導入していない従来触媒と比較して約2・2倍にまで高めること

ORR触媒 白金使用減

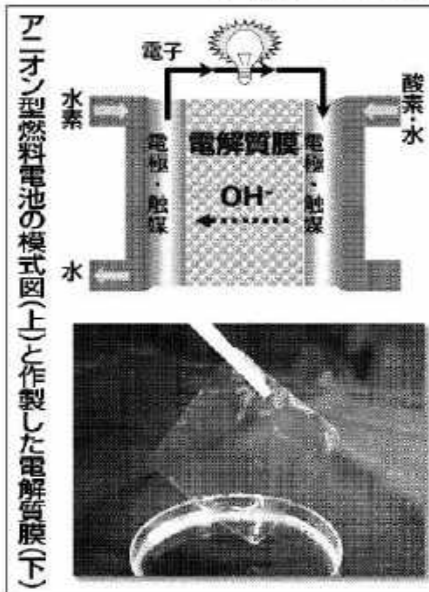
ができた。放射光実験と理論計算により、高活性化のメカニズムがPt微粒子から炭素材料への電荷移動に伴う界面相互作用に起因したPtの酸化抑制にあることも突き止めた。現在、並行して耐久性に関する研究も進んでおり、ORR活性×耐久性の指標で10倍の性能向上を目指している。同じ炭素からなるダイヤモンドでは、原子空孔のような欠陥構造が量子センサーに活用されている。欠陥構造の持つ局在性の効果は、Ptを全く含まないORR触媒の開発にも活用できるのでは、という期待を抱かせる。

量子科学技術研究開発機構(QST)量子ビーム科学部門 研究企画部長(併任)高崎量子応用研究所 プロジェクト「先進触媒研究」リーダー **八巻 徹也**
専門分野は量子ビーム材料科学。ガンマ線、電子線、イオンビーム、中性子線、放射光X線などを用いて、電極触媒から高分子電解質膜まで広く環境・エネルギー材料の研究に従事。博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

未来のクルマ

51



アニオン型燃料電池の模式図(上)と作製した電解質膜(下)

断する。私

「アニオン型」電解質膜を開発

ちはその原因が膜の過度な膨張によることを突き止め、イオン伝導性を維持したまま、膨張を抑えられる構造を探索した結果、この新しい化学構造にたどり着いた。

新開発の電解質膜では、実証試験への移行に十分な600時間以上のアルカリ耐性を実現し、イオン伝導性もプロトン型の実用電解質膜の約1・6倍に達した。燃料電池システムとしてもプロトン型と同等の出力が既に得られている。

今後、電解質膜と電極触媒の接合を改善することにより更なる高出力化を図り、アニオン型燃料電池の市場投入を目指す。

(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 高圧量子応用研究所 フロジェクト「高分子機能材料研究」主幹研究員 **吉村 公男**

専門分野は構造有機化学と高分子化学。ガンマ線、イオンビーム、中性子線、放射光X線などを用いて、高分子電解質膜の構造と機能の相関の解明に関する研究に従事。博士(工学)。

燃料電池低コスト・高出力

せ、耐久性に関わるアルミニウムと鉄の合金は放射線がじめ膜状に成形した高分子材料と有機分子とを結合させる技術は放射線ラフト重合(グラフトラフト重合)と呼ばれる。この技術を使って、フッ素を含む高分子膜に、ガンマ線を照射して高機能な構造を付加した「イミダゾール」が「アニオン型」電解質膜を開発した。

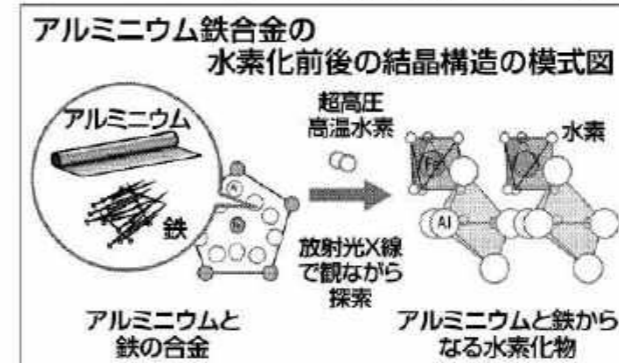
1ステップの処理で新たな構造を付加した「イミダゾール」が「アニオン型」電解質膜の性能向上に有効であることを見いだした。市販の電解質膜は通常「アルキルアンモニウム塩構造」をとり、連続運転下では24時間程度で破

燃料電池自動車では、燃料の水素を空気中の酸素と反応させて発電する「アニオン型」燃料電池が用いられ、その燃料電池の核となる材料が燃料電池膜(電解質膜)だ。現鉄を使用でき、かつ高出力を出している燃料電池は、「プロトン型」と呼ばれ、水素イオンであるプロトンが電解質膜を通って電極間を移動することによって発電する。量子科学技術研究開発機構(QST)では、高コストであり、小型化のための高出力化も課題となっている。これらの課題を根本的に解決するものと期待され

量子科学技術で つくる未来

未来のクルマ

52



アルミニウム鉄合金の水素化前後の結晶構造の模式図

放射光X線で観ながら探索

アルミニウムと鉄の合金

アルミニウムと鉄からなる水素化物

その結晶構造は、放射光X線を用いて探索された。放射光X線を用いて探索された。放射光X線を用いて探索された。

吸蔵合金レアメタル不要に

チタン・鉄合金といった実用材料と同程度の量の水素を蓄えることを示した。

現時点ではこの合金に水素を取り込ませるために7気圧以上の超高压の水素が必要だ。しかし、水素の取り込みを阻害している合金の表面酸化膜の生成を抑えることができれば、実用的な圧力でも水素吸蔵が可能であることが分かっていた。今後、水素吸蔵の圧力を下げる技術を開発し、建物などの設置の水素貯蔵への利用を目指す。

さらには、水素で走る自動車に搭載できるようにすることを期待している。

(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 関西光科学研究所 放射光科学研究センター 高圧・応力科学研究グループリーダー **齋藤 寛之**

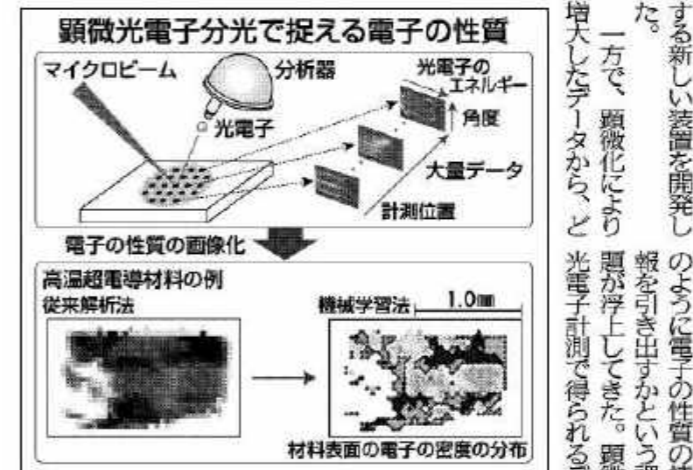
放射光X線を利用した高温高圧合成、特に機能性新規水素化物の探索を中心に研究を進めている。博士(工学)。

自動運転車などによるイスト性は、電気を運ぶパリアフリー社会の実現... 電子の性質(電子の密度)にはスマートフォンを支えるや移動しやすさなどに電子デバイスの高性能化を左右される。この電子の高性能化には、ノイズ源となる光電子分光という...

量子科学技術で つくる未来 未来のクルマ



光電子分光を顕微化



顕微光電子分光で捉える電子の性質... マイクロビーム、分析器、光電子、光電子のエネルギー、角度、大量データ、計測位置... 電子の性質の画像化... 高温超導材料の例、従来解析法、機械学習法、1.0μm、材料表面の電子の密度の分布

ナノビームで材料設計・開発

れる高温超導材料に適したところ、複雑な表面構造に合わせた電子の性質... 現在、国内最高程度の軟X線のナノビーム(ナノは10億分の1)が利用できる次世代放射光施設「愛称: NanoTerasu(ナノテラス)」が建設中だ...

量子科学技術研究開発機構(QST)量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター 上席研究員(兼任) 量子ビーム科学部門 放射光科学研究センター 岩澤 英明

量子科学技術で つくる未来 未来のクルマ



未来の車社会では、人 いるスピントロニクス(工知能(AI))が人に代 バイスは、さまざまな金 わり目的の地までの運転か 風を厚さ数ナノ(ナノは 駐車場での出入庫まで 10億分の1)で層状に積 完全に自動運転している...

鉄表面の磁気構造解明



面・界面近傍の「原子」困難さから、実例報告は 収める元素の磁性を調 べる方法だ。鉄を例に挙 げると、共鳴吸収する鉄 (57Fe)としない鉄 (56Fe)があり、56Fe は、e 薄膜の中に、1原子層 「核共鳴分 だけに57Feを含めるこ 光法」を基 として、57Feを含む原子 層の磁気特性だけを測定 できる。

高性能デバイス早期開発へ

この結果、人類が鉄を 利用して数千年以上の時 を経て、初めて鉄表面の 磁気構造が明らかとなっ た。 QSTが開発したこの 新技術は、単純な鉄薄膜 の表面だけでなく、多層 膜の界面の磁性も計測で きる。現在、対象元素は 鉄に限られるが、多くの スピントロニクスデバイ スは鉄を含むため広範な 応用が可能だ。

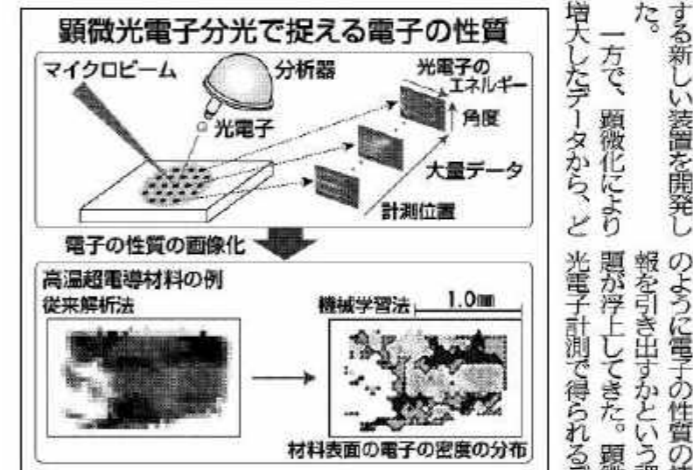
量子科学技術研究開発機構(QST)量子ビーム科学部門 放射光科学研究センター 磁性科学研究グループ 上席研究員 三井 隆也

自動運転車などによるイスト性は、電気を運ぶパリアフリー社会の実現... 電子の性質(電子の密度)にはスマートフォンを支えるや移動しやすさなどに電子デバイスの高性能化を左右される。この電子の高性能化には、ノイズ源となる光電子分光という...

量子科学技術で つくる未来 未来のクルマ



光電子分光を顕微化



顕微光電子分光で捉える電子の性質... マイクロビーム、分析器、光電子、光電子のエネルギー、角度、大量データ、計測位置... 電子の性質の画像化... 高温超導材料の例、従来解析法、機械学習法、1.0μm、材料表面の電子の密度の分布

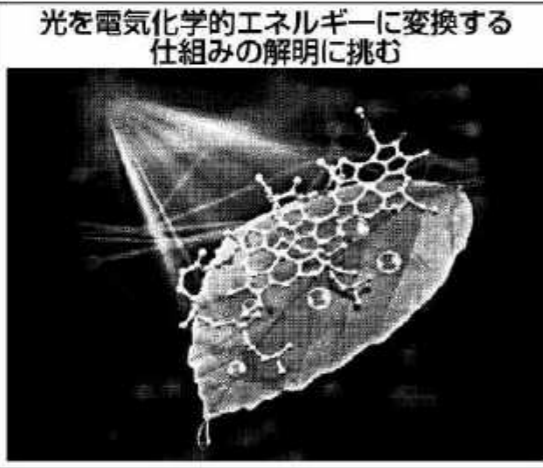
ナノビームで材料設計・開発

れる高温超導材料に適したところ、複雑な表面構造に合わせた電子の性質... 現在、国内最高程度の軟X線のナノビーム(ナノは10億分の1)が利用できる次世代放射光施設「愛称: NanoTerasu(ナノテラス)」が建設中だ...

量子科学技術研究開発機構(QST)量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター 上席研究員(兼任) 量子ビーム科学部門 放射光科学研究センター 岩澤 英明

量子科学技術で
つくる未来
人工光合成で
CO₂削減
55

植物は、太陽からの光を、古典力学では波としてのエネルギーを電気化学して扱う。しかし、二面的なエネルギーに変換し性を併せ持つ量子の振動している。光にはエネルギーを併せ持つ量子の振動をこれ以上分解できない確率的概念を導入し単位があり、これを光た、量子力学が必要でありと呼ぶ。光子は量子の一種である。



光を電気化学的エネルギーに変換する仕組みの解明に挑む

植物、量子効果巧みに利用

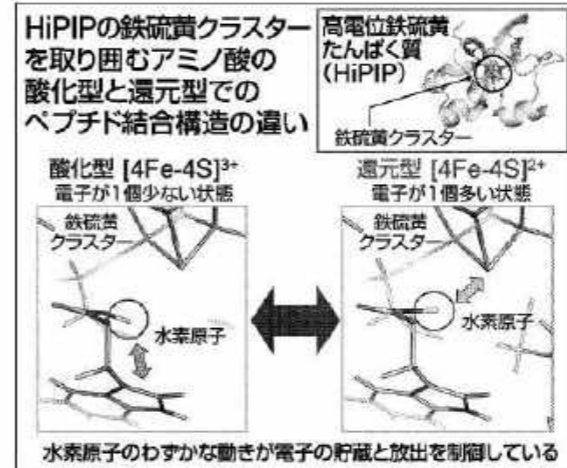
光エネ変換 解明目指す

量子は波動性と粒子性の二面性を持つ。これ化学的なエネルギーへのは、古典力学では許され交換を担うのは、植物の古い古い過去という意味。れたたんばく質である。ではない。100%の重光合成たんばく質は、太陽光から、1秒間に約陽の光エネルギーを効率10の20乗個の光子が飛びよく集めて、エネルギーを出している。この膨大な交換の反応中心に輸送する数の光の振る舞いをまると動きをしている。その

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 河野 秀俊 プロジェクトディレクター
コンピュータシミュレーションと1分子計測により、DNAとたんばく質の運動や形、それらの相互作用によってDNA機能の発現する仕組みを原子・分子のレベルから調べる計算生命科学研究に従事。博士(農学)。(木曜日掲載)

量子科学技術で
つくる未来
人工光合成で
CO₂削減
56

たんばく質は、微生物繋がり、折り畳まれることからヒトまで、すべてので形作られる。こうした種の生命活動を担っている立体構造の決定には、結る分子で、生命反応を精 量化したたんばく質にX 妙に制御する、極めて小線を照射する方法が主に さくかつ精密な1分子機 利用されている。しか 械」と言える。そのメカ し、X線の場合、原子中 ニズムを理解するためにの電子と相互作用するた は、たんばく質の分子の め、たんばく質の半分を 立体構造を原子・電子レ 占める水素原子(軌道電 べルで正確に決定するこ 子数1個)の計測は難し とが必要で、この研究分 い。そこで中性子の出番 野を構造生物学と呼ぶ。 だ。中性子は原子核と直 たんばく質の立体構造 接作用するため、たんば は複雑で、20種類のアミ 質を構成する他の原子 ノ酸(水素、炭素、酸素、 と同様に水素原子を計測 窒素、硫黄原子からなる) できる。量子科学技術研 がペプチド結合で鎖状に 究開発機構(QST)で



HiPIPの鉄硫黄クラスターを取り囲むアミノ酸の酸化型と還元型でのペプチド結合構造の違い

たんばく質中の水素原子計測

中性子で結晶構造解析

たんばく質は、微生物繋がり、折り畳まれることからヒトまで、すべてので形作られる。こうした種の生命活動を担っている立体構造の決定には、結る分子で、生命反応を精 量化したたんばく質にX 妙に制御する、極めて小線を照射する方法が主に さくかつ精密な1分子機 利用されている。しか 械」と言える。そのメカ し、X線の場合、原子中 ニズムを理解するためにの電子と相互作用するた は、たんばく質の分子の め、たんばく質の半分を 立体構造を原子・電子レ 占める水素原子(軌道電 べルで正確に決定するこ 子数1個)の計測は難し とが必要で、この研究分 い。そこで中性子の出番 野を構造生物学と呼ぶ。 だ。中性子は原子核と直 たんばく質の立体構造 接作用するため、たんば は複雑で、20種類のアミ 質を構成する他の原子 ノ酸(水素、炭素、酸素、 と同様に水素原子を計測 窒素、硫黄原子からなる) できる。量子科学技術研 がペプチド結合で鎖状に 究開発機構(QST)で

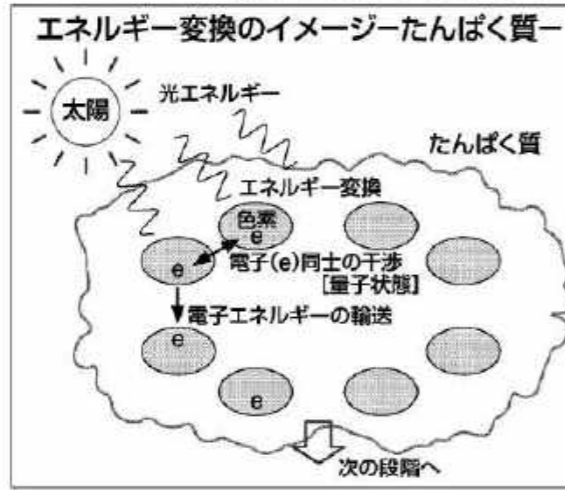
量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 玉田 太郎 構造生物学研究チーム チームリーダー
複数の量子ビーム(中性子とX線)を用いた生体高分子(主にたんばく質)の構造研究と装置開発、構造情報に基づくたんばく質分子の機能解明と有用分子の設計・創製に従事。博士(理学)。(木曜日掲載)

量子科学技術で つくる未来

人工光合成で CO₂削減

57

光合成の出発点は、太ミノ酸が直鎖状につながった陽の光エネルギーを電子として蓄積しているが、実はこのエネルギーに変換するだけで太陽の可視光線である。そこにも光を吸収しない。たんぱく質は、地球の歴史とともに進化してきた巧妙な生物の仕組みがある。人類が活動を継続していくために光合成は必須。たんぱく質は何力にも地球に酸素とエネルギーが規則正しく配置され、源となる有機物を提供して、特定の立体構造をとってきている。もちろん、二酸化炭素(CO₂)削減にも欠かせない。生換の根拠がある。光を吸収する色素を規則正しく配置していることが、たんぱく質は20種類のア陽の光エネルギーから電



21世紀になってから、光合成において、たんぱく質の量子効果が電子エネルギーの超効率輸送に関係しているのでは、という見解が出てきた。この見解は量子技術を駆使した観測がきっかけとなった。一言で量子効果といってもさまざまであるが、光合成で重要なのは色素間を高速で往復する電子の振る舞いである。たんぱく質が使っている色素の種類や構造、色素間の距離や角度などの配置、

高速な電子の動き計測へ

色素の周りの環境に遷移の巧妙さを、高速な電子の動きを計測して明らかにすることが現在の課題だ。私たち量子科学技術研究開発機構では、光エネルギーを電子のエネルギーに変換・輸送するたんぱく質を人工で作ることに取り組んでいる。さまざまな視点で改変した人工のたんぱく質を作製し、それを最先端の量子計測技術で測定することによって、量子がかかわる巧妙な仕組みを深く理解する研究に取り組んでいる。得られる知見は人工光合成に活用され、自然を凌駕する創造的なたんぱく質の設計をも可能にするであろう。(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 タンパク質機能解析研究チーム チームリーダー **安達 基泰**

地球の歴史に重ね合わせられる過程を経て進化してきた生物分子の魅力に興味を持っている。近年は、非常に複雑なたんぱく質ならではの量子効果と機能性を追究する研究に従事。博士(農学)。

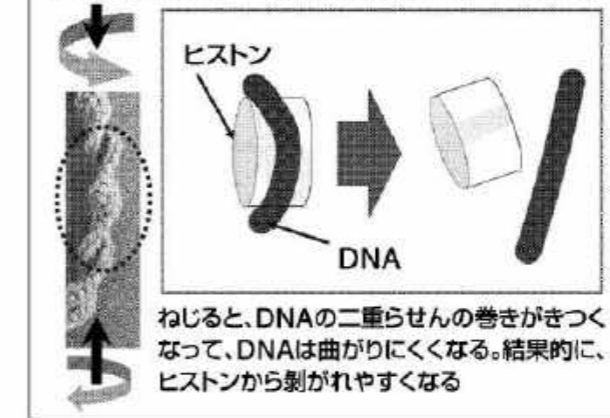
量子科学技術で つくる未来

人工光合成で CO₂削減

58

私たちヒトのゲノムDNAは、直接数分(マ)この収納状態の詳細な構造は1000万分の1の細胞の核に収納されている。ヒトの場合、それを構成する全長約2.5mのDNAのひもも動いている。京、富もがヒストンと呼ばれる蛋白質を用いた計算機科学的なアプローチで、たんぱく質の芯にDNAの巻き付きを再現した。DNAのひもが巻き付いた構造は、そういった複雑な構造でコンパクトに収納されている。DNAに記された生命の設計図「遺伝子」は、たんぱく質と核酸(DNA)に刻まれた遺伝情報(RNA)との巧みな相互作用によって、収納状態のDNAから読み出さ

ねじれの力によって遺伝情報のコピーを効率化



ねじると、DNAの二重らせんの巻きがきつくなって、DNAは曲がりやすくなる。結果的に、ヒストンから剥がれやすくなる。そのRNAの情報に、そのRNAの方向自体が、遺伝子の読み出しのされやすさと密接に関係していることが分かってきた。RNAポリメラーゼがDNAの上を走って情報を読み取ると、前方のDNAは巻きがきつくなる方向に力を加える。巻きがきつくなったDNAは曲がりやすくなって、結果的にDNAがヒストンから剥がれやすくなる。これが分かった。つまり、RNAポリメラーゼの運動が前方のDNAをたんぱく質の芯から剥がし、メッセージRNAへの遺伝情報

分子同士の絡み合い着目

ねじると、DNAの二重らせんの巻きがきつくなって、DNAは曲がりやすくなる。結果的に、ヒストンから剥がれやすくなる。そのRNAの情報に、そのRNAの方向自体が、遺伝子の読み出しのされやすさと密接に関係していることが分かってきた。RNAポリメラーゼがDNAの上を走って情報を読み取ると、前方のDNAは巻きがきつくなる方向に力を加える。巻きがきつくなったDNAは曲がりやすくなって、結果的にDNAがヒストンから剥がれやすくなる。これが分かった。つまり、RNAポリメラーゼの運動が前方のDNAをたんぱく質の芯から剥がし、メッセージRNAへの遺伝情報



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 プロジェクトディレクター **河野 秀俊**

コンピュータシミュレーションと分子計測により、DNAとたんぱく質の運動や形、それらの相互作用によって、DNA機能の発現する仕組みを原子・分子のレベルから調べる計算生命科学研究に従事。博士(農学)。

物質の多くの性質は物かによって、生体内質内の電子の状態によっての化学反応の起こり方によって決まる。この電子状態やエネルギー移動の様子を見るには軟X線が最も明らかになる。こうした強力な光である。現在、た反応メカニズムを理解する量子科学技術研究開発機構(QST)は、官民連携生体分子反応を模倣するパートナーシップの下、近道となる。

仙台市の東北大学構内に、たんぱく質の分子構造を高精度軟X線放射光施設を調製するX線結晶構造解析施設「ナノテラス」を建設中である。この施設は2024年4月に運用開始を予定しており、QSTはここを、波長が100倍以下の100nm程度の軟X線を用いて、たんぱく質の電子状態を明らかにする。この施設を利用して生体内の電子状態を明らかにする。



たんぱく質内につしか存在しない金属元素周辺の電子状態を探る

軟X線のエネルギーを選別して分光実験を行うことで金属元素近傍の電子状態を解析

波長が長いと大気中のは著しく減少する。その分子との強い相互作用のため軟X線を効率よく利用するためには、真空状態での照射実験が必要とされる。近年の真空技術やX線窓材料の開発によって、生体試料を用いた液体実験、さらには溶液を直接真空内に放出させた状態での軟X線分光実験も可能になっている。

放射光施設ではエネルギーを選別した実験を行うことができる。電子励起エネルギーが元素によって異なることから、軟X線のエネルギーを選択した分光を行うことで、分子中の特定の元素近傍の構造・電子状態を詳細に調べることができる。

例えば、数万个の原子の集合体であるたんぱく質分子の中に、たった一

たんぱく質内につしか存在しない金属元素周辺の電子状態を探る

軟X線のエネルギーを選別して分光実験を行うことで金属元素近傍の電子状態を解析

生体分子の電子状態 理解

つか含まれない金属元素の周りの情報をピックアップして観測することも可能である。光合成過程の中で活躍しているたんぱく質複合体にも金属元素が含まれ、その過程の中心的な役割を担うことも多い。

このように複雑な分子の特定元素近傍の電子状態を局所的に探るのに、この放射光軟X線分光が適している。我々は生体分子の電子状態を理解するための新たなツールとなる軟X線分光技術の開発を進め、光合成過程での化学反応の起こり方を明らかにすることによって、人工光合成などの開発に役立てたいと考えている。(木曜日掲載)

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 電子物性生命科学チーム チームリーダー **藤井 健太郎**

放射光を用いたDNAやたんぱく質などの生体高分子の分光実験に従事。最近東北大学内に建設中のナノテラスの建設チームに参画して軟X線を用いた生命科学的研究を実施。博士(理学)。



2020年初頭から現てもその温度はかなり異在に至るまで世界中がコなるはずだ。体表面の温度を計測するサーモグラフィ状態を把握するために体温計や生体温度を測る機会が増えた。深部にある臓器や組織にありゆる場所には温度計が測れない日は計測できない。これは、温度が生命活動にとって極めて重要な情報だからだ。

ただし、生体の全ての臓器や組織を構成する上で温度を示すのは細胞だが、厳密に測るには容易に想像が難しい。例えば、細胞温度もそれる。腕の下指先では当然、室温よりはるかに高い。各臓器や組織の温度を計測する



究極の細胞健康診断

ここでできれば、生命科 有無をある程度は言える。学が発展において極めてまでもなく、かつ、さまざまな病気の原因究明にできる。期待される。すなわち、「究極の細胞健康診断の実現」が可能となるわけだ。

これを実現するために、細胞より非常に小さな温度計(温度センサー)が必要になる。そこで、大きな注目を集めているのが、量子技術を導入したナノサイズのダイヤモンドなどを材料とする生体ナノ量子センサーだ。

このセンサーを各組織や臓器、およびそれらを構成する細胞に送り届けることで、届いた先の温度だけでなく、細胞内の水

ナノ量子センサーで実現へ

素イオン指数(pH)、磁場、電場、硬さなどの情報もセンサーから得ることが可能。さらにはこれらの情報は、量子技術を巧みに応用することで同時に計測することが可能だ。ここに大きな魅力がある。生体ナノ量子センサーによる「究極の細胞健康診断の実現」は、決して夢物語ではないのだ。

本稿を含め全6回のシリーズで、この非常に魅力的なナノ量子センサーの紹介(第2回)をはじめ、生命科学への応用として、がん(第3回)、免疫・炎症(第4回)、脳疾患(第5回)、再生医療(第6回)における最新の研究状況を紹介します。(木曜日掲載)

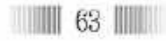
量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 プロジェクトディレクター **湯川 博**

東京大学大学院工学系研究科、名古屋大学大学院医学系研究科を経て現職。クロスアポイントメントにより名古屋大学特任教授。ナノ量子センサーによる再生医工学研究に従事。博士(工学、医学)。



量子科学技術で つくる未来

量子 スマートセル



炎症とは熱、発赤、腫れ、痛み、機能障害を伴う。これらは、痛みなど症状を指す。急性炎症は一過性の炎症であり、徘徊などの患者自身の生蚊に刺された時のように、放っておくといつもの間に治っているものである。一方、慢性炎症は放っておいても炎症が収束しない。従って健康することはなく組織の機能障害が現れた時点で「病気の芽」である。従って健康することはなく組織の機能障害が現れた時点で「病気の芽」である。

これまでの研究から慢性炎症は、関節リウマチなどの免疫疾患だけでなく、動脈硬化、認知症やうつ病などの長寿社会特有の細胞の炎症誘導機構の主要な疾患の原因で「IL-6アンブ」と新



「微小炎症」慢性化防ぐ

規の神経免疫連関である発見、報告してきた。「ゲートウェイ反射」IL-6アンブが活性化

した組織の細胞は「病気の芽」でありこれが拡大、慢性化することにより慢性炎症状態となる。また、重要なことにそれぞれの病気の芽はそれぞれ異なる細胞のIL-6アンブやそれ以外の分子が反応する免疫細胞が活性化し、これらの活性化細胞からは特定の分子を細胞外に放出する。例えば、腎臓の尿管上皮細胞からの特定のたんぱく成分などがある。しかし、未病時のこれらの成分の検出は、これまでの技術では不可能であった。

病気の芽、自動で摘む

機構(QST)ではこの課題に挑戦すべく、ナノダイヤモンド(ND)量子センサーや人工知能(AI)を用いたAIナノボアを使った研究を実施している。具体的には、たんぱく成分などの病気の芽から産生される因子の検出物質をNDに結合させ、極めて少量の血液や尿試料からこれら因子を超高感度かつ高精度に検出する。検出できた病気の芽は、ゲートウェイ反射や迷走神経を含む神経回路の人為的な刺激で除去する。量子技術を含むこれらの技術の融合から、未病時において病気の芽を自動で摘む「未病時のオートマティック医療」を達成する。(木曜日掲載)



北海道大学 遺伝子病制御研究所 教授
QST量子生命科学研究所 チームリーダー 村上正晃
自然科学研究機構 生理学研究所 教授

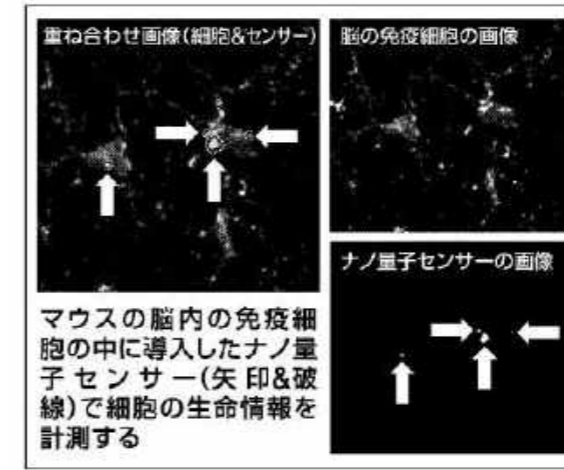
現在、慢性炎症病態の制御を目的にムーンショット目標7の代表者に採択され、量子技術と神経刺激を用いて病気の芽である「微小炎症」を標的に「未病時オートマティック医療」の実現を目指している。

量子科学技術で つくる未来

量子 スマートセル



脳は、「見る」「聞く」「考える」などの、ギンとなる。まさに「心」を生み出す。筆者は、これまでに脳重要な臓器である。脳が細胞の機能を理解するた担う高次な情報処理機能に生きた動物の組織や細胞は、多くの神経細胞で形細胞を直接観察してき成される複雑なネットワーク。この生体内の観察に「ク回路」と、その周囲には、マクロレベル(例えば存在するグリア細胞や脳細胞)からミクロレベル(一つの細胞)までさまざまなスケールで立っている。これら神経・グリア・血管が生み出す相互に調和のとれた関係性が乱れると脳の病気につながる。そのため、境(温度や水素イオン指)や相互関係の理解は、新を計測できる「ナノ量子」な治療技術や診断法の「センサー」の生命科学応



用が進んでおり、主に培養細胞などの試験管内で実現されている。このナノ量子センサーは、生体内の複雑な細胞内状態の変化を観察できるかもしれない。そこで、量子科学技術研究開発機構では、ナノ量子センサーの細胞内導入技術や専用のレーザー顕微鏡などの計測技術の開発とその生物・医学応用を進めている。

最近の成果としては、げっ歯類のマウスの脳内の免疫細胞に、ナノ量子センサーを導入し(図参照)、細胞内温度の計測に成功した。さらに、認知症を再現したモデル動物の脳表の免疫細胞の温度を試験的に計測した結果、細胞内温度低下を検

脳疾患ナノセンサーで知る

生きた動物の細胞変化観察

出し、病気に伴う代謝低下を測っている可能性を示した。

現在、生体ナノ量子センサーにより、神経細胞やアストロサイトや血管の細胞内外の温度計測に取り組んでいる。この温度計測により、神経活動による局所的な血流の制御機構や脳卒中などの病態進行に関する情報が得られるかもしれない。

このように、生体ナノ量子センサーは、細胞の微小環境を知る新たなツールとして生物・医学応用が進むことが期待されている。それにより、正常時と疾患時における脳細胞機能の多様でダイナミックな変化がとらえられるに違いない。(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 量子神経マッピング制御研究チーム 主幹研究員 田桑弘之

ナノ量子センサーなどの新たな生体イメージング技術を導入し、生物・医学研究への応用を進めている。特に、脳卒中や認知症などの疾患メカニズムを神経・グリア・血管の相互関係の観点から研究している。博士(理学)。

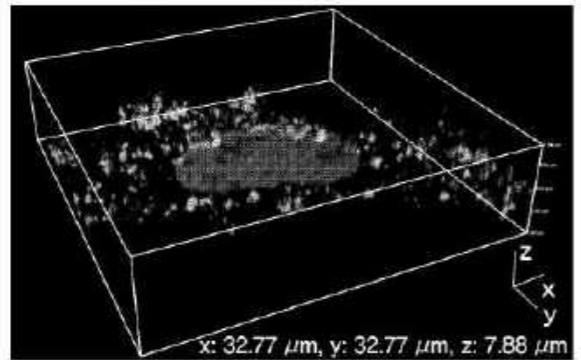
量子科学技術で つくる未来

量子 スマートセル

65

細胞状態を示す細胞内... 温度、水素イオン指数... 量子科学技術研究開発機構(QST)...

超解像顕微鏡による幹細胞内のナノ量子センサー



幹細胞内にナノ量子センサーを導入することで、細胞状態を示す温度などの物理化学的パラメーターの計測を実現

物理化学的パラメーター 細胞内で同時計測... 温度は必ず37度Cとは限らず、体温が低いところもある...

再生医療・がん免疫療法に貢献

量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所 プロジェクトディレクター 湯川博



湯川博 プロジェクトディレクター

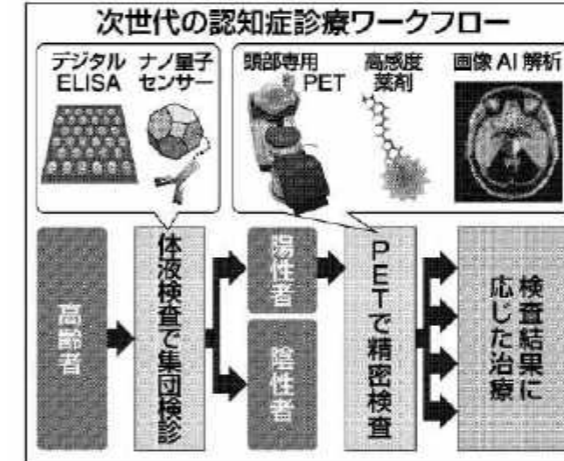
東京大学大学院工学系研究科、名古屋大学大学院医学系研究科を経て現職。クロスアポイントメントにより名古屋大学特任教授。ナノ量子センサーによる再生医工学研究に従事。博士(工学、医学)。

量子科学技術で つくる未来

認知症の 超早期診断

66

アルツハイマー病は 常なたんぱく質が蓄積... 量子科学技術研究開発機構(QST)では、認知症の超早期診断...



次世代の認知症診療ワークフロー... デジタルELISA、ナノ量子センサー、PET、高感度薬剤、画像AI解析...

脳の働き解明「よりよく」生きる

止めたとしても、脳の働きが健全に営まれない... 量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命科学研究所 脳機能イメージング研究部 部長 樋口真人



樋口真人 脳機能イメージング研究部 部長

東北大学医学部卒。老年内科医を経て、米国ペンシルベニア大学、理化学研究所で基礎研究に従事。放射線医学総合研究所(現QST)に赴任し、基礎と臨床をつなぐ脳疾患研究を推進。博士(医学)。

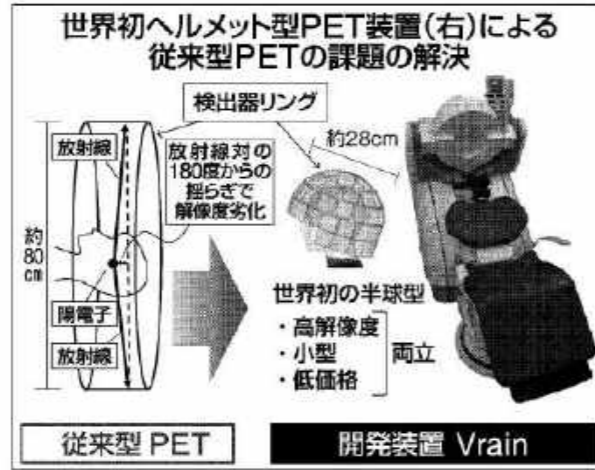
量子科学技術で つくる未来

認知症の 超早期診断



ボジトロン断層撮影 (PET) は、形の変化の陽電子から2本の放射線が現れる前の機能的な異常線がほぼ正対方向に出ることを、いち早くボジトロン断層撮影 (PET) を支える (陽電子) を使って画像の物理法則であり、2次元化する。これは、形を画像の放射線を同時に捉えて化するCTやMRIとは、陽電子の位置を線上に特定する異なる大きな特徴で、定する。しかし、このあり、いまやPETは「ほぼ」がミソであり、人診断に不可欠な検査法。従来の全身用のPET装置となった。一方、認知症に、画では、この180度かおいては、発症機序と関の挿らぎが数、材の解連する脳内の異常たんば、像劣化を引き起こすく質の画像化に強みを発 (図参照)。

要因の一つは、放射線は、頭部に特化したPETを捉える検出器のトンネル装置の開発に取り組ん



ヘルメット型PET開発

できた。具体的には、検査レベルにするのはもちろめ、検査自体の性能を世界最良のものにすること、検出器にも注力した。その結果、たどり着いた頭部用PETの理想形が、世界初となるヘルメット型PET装置である。

ヘルメット型PET装置は、7年間にわたるアトックス(東京都港区)との共同研究を経て、2022年1月に製品名「Vrain」として販売開始に至った。最新の従来型PET装置でも区別できないような脳の細かい神経核までもが、明瞭に画像化できる優れた性能を誇る。

半球型は、使用する検出器の数が従来PET装置

脳画像検査の切り札に

置の数分の1で済むため、世界最高レベルの性能でありながらも世界最小でもあり、高い普及性を併せ持つ。珍しい座位型もポイントであり、リビングでソファに座ると同じような感覚で、リラックスしてPET検査を受けてもらえるだろう。

実はPET装置の約9割は輸入であるが、PET装置のコア技術の一つである光検出器に関しては、日本製の部品が世界中のPET装置で使われている。Vrain開発の成功を支えたのはこのような日本の優れた量子科学技術であり、今後のより一層の医療への貢献が期待される。

(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子医科学研究所 先進核医学基盤研究部 次長 山谷 泰賢

東京工業大学で機械工学や画像工学を学び、それらを未来の医療に役立てる研究開発を推進。本質を捉えた独創的発想を大切に、それを実用化し患者さんに届けることを重視している。博士(工学)。

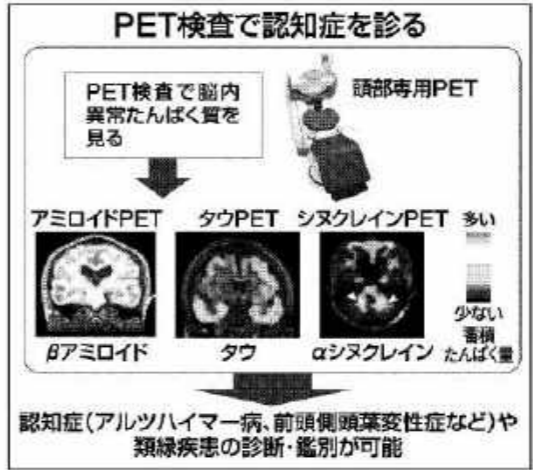
量子科学技術で つくる未来

認知症の 超早期診断



認知症では、神経細胞が機能異常を起し死に至ることで、物忘れや運動障害、精神症状などの多彩な症状が現れる。診断技術では、この異常な状態の脳の中では、たんばく質の蓄積は死後特定のたんばく質が構造的に異常となり、異常なたんばく質凝集体(アミロイド)を形成する。たんばく質凝集体(アミロイド)は、技術は生きたまま体内で正常な機能を喪失することに加え、異常なたんばく質凝集体は、凝集することから、認知症の原因となる異常なたんばく質の胞にダメージを与え、細胞死を引き起こすと考えられている。

アルツハイマー病の指標となるβアミロイド沈着を可視化するPET薬



PET薬剤指標可視化

PET検査で脳内異常たんばく質を見る

認知症(アルツハイマー病、前頭側頭葉変性症など)や類縁疾患の診断・鑑別が可能

PET検査で脳内異常たんばく質を見る

アミロイドPET (βアミロイド) タウPET (タウ) シヌクレインPET (αシヌクレイン) 多い 少ない

認知症(アルツハイマー病、前頭側頭葉変性症など)や類縁疾患の診断・鑑別が可能

認知症検査 手軽な時代に

シヌクレイン病変はハイキンソン病やレビー小体型認知症で見られる神経病理像である。βアミロイドPET、タウPET、αシヌクレインPETが可能となったことで、アルツハイマー病、パーキンソン病、その他の認知症を画像診断により鑑別できる時代が到来したと言える。

PETイメージングは認知症の早期診断だけでなく治療効果を判定する上でも欠かせない技術である。QSTではPET薬剤の薬用化と低コスト・高性能PET装置の普及を積極的に進めている。誰でも気軽に認知症PET検査を受けられる世界がもつてこよう。

(木曜日掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子医科学研究所 脳機能イメージング研究部 上席研究員 佐原 成彦

東京理科大学理工学部卒。東京都精神研、大阪市立大学医学部、米国メーヨークリニック、理化学研究所、フロリダ大学、放射線医学総合研究所(現QST)で認知症基礎研究に従事。認知症モデル動物を用いて診断・治療薬の開発を推進。博士(理学)。

量子科学技術で つくる未来

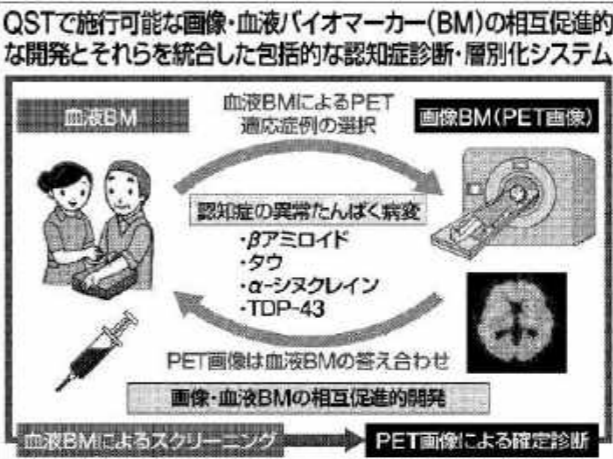
認知症の 超早期診断

70

アルツハイマー病(Aβ機構(QST)では、患者の脳内タウ病変およびαナシスクレイン病変のPETによる画像化に世界を先駆けて成功している。また、血液BMについて、筆者らは、ADに特異的なリン酸化タウタンパク質を、血液中で定量的に測定できる高感度測定システム(従来法の1000倍の感度)を開発し、その血液BMは、検査施設が限定・低コストで高スル、他にも複数の認知症関連たんぱく質を血液BMで定量できる測定系をすでに開発・報告している。

量子科学技術開発機構(QST)は、近年、世界的に開発が進んでいるナノ量子センサーを用いた認知症・ウィルス感染症などの超早期診断を実現する研究にも着手している。以上のようにQSTは、多項目の画像・血液BMを、施設で相互促進的に開発・検証し、一体化したシステムとして実用化して行くことが可能な国際的にも限られた研究機関である。

さらに、QSTでは、「血液・画像BMを一体化したシステムの開発・



検証」を大規模コホート(集団)で実施するため、国内の多数の施設で画像データと血液標本の収集を行う組織Multiance for Alzheimer Biomarkers(MAB)を2020年に立ち上げている。MABには現時点で国内18施設が参加しており、全体で年間350例以上の多様な認知症患者の登録が可能である。

さらに、今後、MAB研究参加機関は、検証済みの画像・血液BMを用いた治療薬候補物質の治験における主要な実施機関となり、BMの医薬品・医療機器承認が得られた後も、その普及や市販後臨床試験を担うコア機関となるが見込まれる。(木曜日掲載)

PET検査の欠点補完

PET検査の欠点補完

量子科学技術開発機構(QST) 量子医学研究所 脳機能イメージング研究部 部長 徳田 隆彦

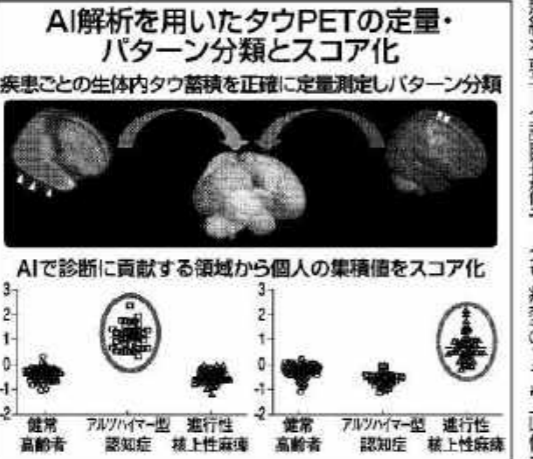
信州大学医学部卒、脳神経内科専門医。東京都精神医学総合研究所、米国ニューヨーク大学で認知症のたんぱく化学研究を学んだ。認知症および神経変性疾患の体液バイオマーカー研究に従事。博士(医学)。

量子科学技術で つくる未来

認知症の 超早期診断

69

認知症の大半は、脳の 症が含まれる。中に異常なたんぱく質が蓄積する神経変性型の認知症で占められ、アルツハイマー病(主に記憶力障害を呈す)、前頭側頭葉変性症(変性部位により人格変化や言語・運動障害など多彩な症状を呈す)、レビー小体型認知症(物忘れのほか、幻視、体の動きがぎこちなくなるなどのパーキンソン症状を伴う)の3大認知症からなる。前頭側頭葉変性症には進行性核上性麻痺という、体の動きの障害を伴う認知



能になった。しかし、PET画像解析技術が必要である。PET画像から診断に役立つ情報を得るためには、熟練を要する読影技術や、タウ病変のPET画像を人工知能(AI)で解析することにより、アルツハイマー病や、進行性核上性麻痺など、多様な神経変性型の認知症に生じる特徴的な脳内の病変を自動的に認識し、認知症の診断と鑑別に役立つスコアを算出することに成功した。AIが算出するスコアによって、アルツハイマー病患者、進行性核上性麻痺患者、健康高齢者の3者を95%以上の正確さで識別することが可能になった。また、スコアの高さと疾患の重症度との関連を見いだし、病期の進行度をスコアから客観的に評価できるこ

スコア算出 鑑別に一役

とも分かった。このように、QSTが開発したAI解析技術は、認知症の全自動診断に向けた基幹技術であり、さらにさまざまなタイプの認知症の画像を学習させることで、幅広い疾患の鑑別が実現することが期待される。

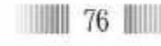
現在、診断法としてのタウPETの臨床試験が進んでいるが、これと合わせて自動診断を実用化させることも構想中である。タウ病変に対する治療薬候補が多く、製薬企業により開発されているため、今後、治療薬の治験においてタウスコアによる被験者リクルートの精度向上や薬効評価の自動化も可能になると見込まれる。(木曜日掲載)

量子科学技術開発機構(QST) 量子医学研究所 脳機能イメージング研究部 研究員 遠藤 浩信

北里大学医療衛生学部卒後、大分大学医学部へ編入。卒後神戸大学で脳神経内科医として臨床を経て、同大学院博士課程修了(医学)。米国ジョンスホプキンス大学への留学を経てQSTに赴任。

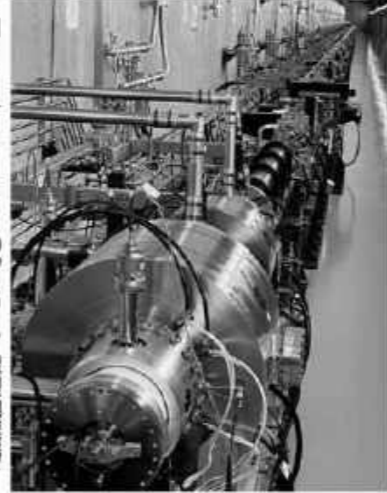
量子科学技術で つくる未来

物質の機能を 可視化する



次世代放射光施設 NanoTerasu の蓄積を一定に保たなければならぬ。これは蓄積リングでは、光速（毎秒 30 万キロ）の 99.9% を周回する電子束を精度で測定し、失われた分を補う必要がある。太陽光の 10 倍に電子を生成・供給する倍以上の明るさをもつ高強度 X 線を生成すること。全長が 110 分の線型加速器は、電子群を生成する電子銃、生成された物質科学などの実験で高精度のデータを得るに、X 線強度を長時間にわたって安定に維持することが不可欠である。それを成すには、X 線の発生電子銃は、10000 度以上を蓄積リングに蓄

NanoTerasu の 3GeV 線型加速器



とその後には配置した。リッドメッシュ電極の間で高電圧を与えることで、バルス状の電子ビームを引き出す。このとき、一度に生成する約 60 億個の電子群は、ビームコリメーターで約 20 億個の高品質電子ビームは、集積

高密度電子ビーム生成

X線強度 長時間安定維持

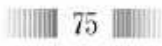
かつ安定に加速エネルギーを付与するには、3兆分の 1 秒（300 億分の 1）という高精度で加速タイミングを合わせる必要がある。これには大規模 X 線高速処理を可能とするデジタル制御システムを使用することで実現する。こうした先端技術を用いることで高品質電子束生成が可能となる。将来、線型加速器で生成した高品質電子ビームに直接、蛇行軌道を与えることによって、NanoTerasu のさらに 1 億倍以上の高強度 X 線を生成する「軟 X 線自由電子レーザー」への展開も計画している。



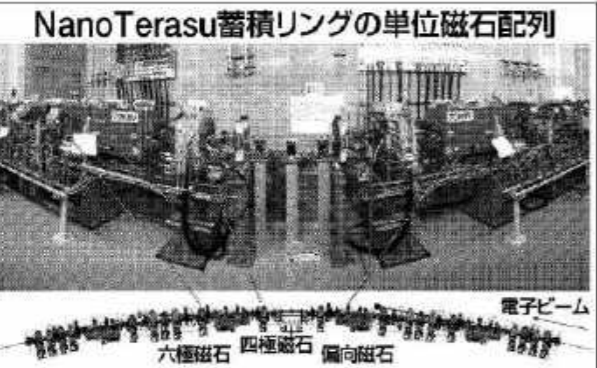
量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター 高輝度放射光研究開発部 上席技術員 **安積 隆夫**
次世代放射光施設 NanoTerasu 加速器の設計・開発研究に従事。2024 年度からの利用運転に向けた加速器整備、運転準備を進めている。博士(理学)。

量子科学技術で つくる未来

物質の機能を 可視化する



光速に近い速度で走る電子が磁石などその軌道を曲げられたときに「放射光」と呼ばれる非常に輝度の高い X 線が放射される。この原理を利用した放射光施設は、主に電子にエネルギーを与え、電子を蓄積すると共に放射光となる蓄積リング、放射光実験の場となるビームラインで構成されている。



このプリズム分散を軽減する。蓄積リングには最新の MBA 個々の電子から放射光がランダムに発生し、エネルギーが低下することで生じる。そこで、MBA 設計により電子ビームの空間広がりを抑制することとした。MBA 設計は、偏向磁石の細分化と四極磁石の

放射光蓄積リング整備

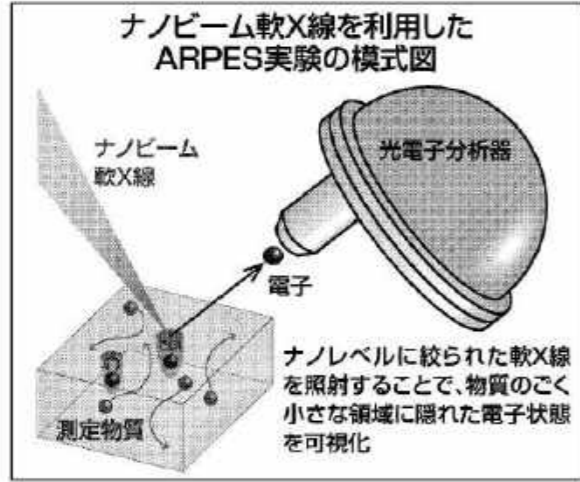
プリズム分散 極小化

取束レンズ機能を組み合わせたにより、偏向磁石内のプリズム分散を極小化する仕組みを有する。こうした一連の技術の導入により、NanoTerasu 蓄積リングは世界最高クラスの高輝度放射光を発生させることが可能となった。また、蓄積リングのコンパクト化のため新型の高次モード加速空間を世界に先駆けて導入した。これにより、ビームラインスペースが十分に確保され、利用者が実験しやすい環境となった。2024 年度からのユーザー向けに NanoTerasu 蓄積リング整備を鋭意進めている。また、将来の軟 X 線自由電子レーザーの増設も展望している。(木曜日に掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 次世代放射光施設整備開発センター 高輝度放射光研究開発部 加速器グループリーダー **西森 信行**
3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu 加速器の設計・製作・設置の全体統括と、建屋インフラ設備との調整に従事。24 年度からのユーザー向けに加速器試運転の準備を進めている。博士(理学)。

**量子科学技術で
つくる未来**
物質の機能を
可視化する
79



次世代放射光施設「ナノテラス」において量子科学技術研究開発機構(QST)が整備する3本の共用軟X線ビームラインのうちの一つがARPES(角度分解光電子分光)ビームラインである。光電子分光は物質に高いエネルギーの光を照射し、他の手法ではまねて放出される光電効果という現象を利用したもの。この放出された電子のエネルギーや放出角度を調べることで物質中の電子の量や動きを可視化することができる。ナノテラスでは、ビームラインは、物質のごく限られた領域のみを照らし、その部分だけを照らすことができる。この電力輸送やデバイスに研究が行われている。このような特殊な現象は、往々にして物質の中心部分で起こっている場合がある。ナノテラスのARPESビームラインでは、細く絞った軟X線ビームによって、そのごく一部の領域の電子状態だけを抽出して分析することが可能であり、これまで見つけられなかった新現象の発見やその解明につながるデータを得ることができると期待されている。

次世代イノベ創成に貢献

この軟X線ナノビームと組み合わせたことにより、微細加工したデバイスの動作領域にスポットを当て、その領域だけの電子の動きを可視化することが可能になる。これはデバイス特性の向上につながるという応用研究の用途だけではなく、目的のデバイス構造を設計することで、物質に電圧や圧力などの外場を加えたときに現れる新たな物理現象を発見できる可能性もある。

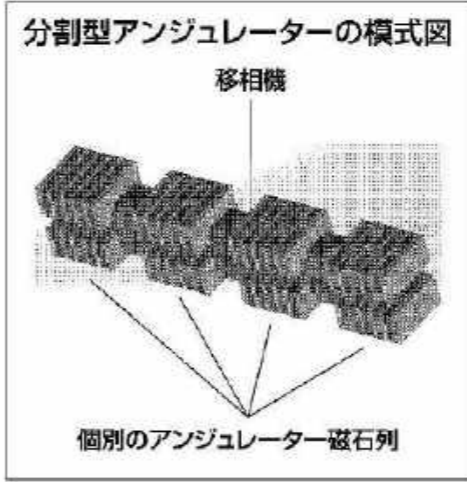
さまざまなアイデアでこの実験手法が広く活用されることにより、超低消費電力デバイスの開発や量子コンピュータの実現など次世代イノベーションの創成に貢献できることを期待している。



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター 高輝度放射光研究開発部 上席研究員 **堀場 弘司**

放射光を用いた半導体やリチウム(Li)イオン電池など固体材料・デバイスの分光研究に従事。ナノテラスではARPES研究のための共用軟X線ビームラインと実験装置の設計および建設を担当。博士(工学)。

**量子科学技術で
つくる未来**
物質の機能を
可視化する
80



相互作用が大きく電子物性機構(QST)は、官民共同で軟X線偏光XMCDBビームラインの構築に邁進している。従来の偏光軟X線放射光施設「ナノテラス」を連結するアンジュレーター(アンジュレーター)を特定配置に動かして発生する手法が一般的だったが、磁石同士の強い磁力に逆らって磁石列の再配置を頻りに行う必要がある。偏光操作に時間を要していた。

そこで、ナノテラスの偏光XMCDBビームラインでは、既存のアンジュレーターを四つ一組で同時に運用し、さらに電磁石を途中に挿入することでそれぞれのアンジュレーターから発生する放射

磁石の性能・性質制御

光同士を干渉させる(移相機)ことで偏光を作ります。磁石列を頻りに動かすことなく、干渉条件の調整だけで偏光放射光の発生が可能となり、偏光の切り替えを従来よりも格段に高速、高精度で行える見込みだ。

この分割型アンジュレーターにより、従来技術では見えない小さな空間における微量の電子スピンの変動を検出できるようになる。この軟X線偏光XMCDBビームラインが、新たな磁気的性質の発見やその制御法の開発、ひいては新たな磁石利用製品の開発に役立てられればと期待している。

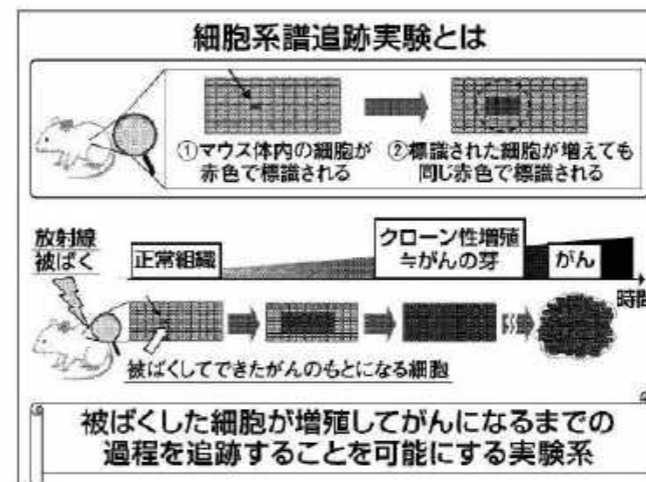


量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター 高輝度放射光研究開発部 主任研究員 **大坪 嘉之**

放射光を用いて低次元電子のスピンの偏極構造を明らかにする研究に従事。東北大学内に建設中のナノテラス偏光チームの一員として主にXMCDBビームラインの建設を担当。博士(理学)。

広島・長崎の原爆被爆 発生するがんとは別の道... 量子科学技術で つくる未来

被ばく防護と医療 86



細胞系譜追跡実験とは... 被ばくした細胞が増殖してがんになるまでの過程を追跡することを可能にする実験系

細胞系譜追跡で起源解明... この実験系では、一例として組織内の特定の細胞を赤色で標識することが出来る。

量子科学技術研究開発機構(QST) 飯塚 大輔 放射線がんメカニズム研究に従事。博士(獣医学)。

2021年3月に量子 施を判断するための重要... 量子科学技術で つくる未来

被ばく防護と医療 85



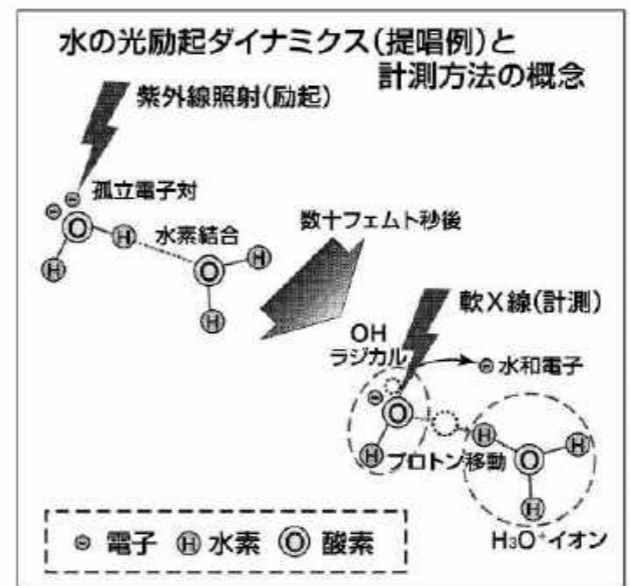
体内の放射性核種 検出... 作業者の測定の際にも活 とともに減少していること... 使用済み核燃料に含まれているアクチニド核種

内部被ばく線量 30分で測定... また、アクチニド核種による内部被ばく事故に... 便を分析するバイオアッセイによるα線の測定も

量子科学技術研究開発機構(QST) 谷 幸太郎 体内に取り込んだ放射性核種による内部被ばく線量の評価に関する研究に従事。博士(工学)。

軟X線領域の光を用い、能な軟X線光源として世
ると、さまざまな化学反 界で研究開発が進められ
応、例えば、触媒反応や ている。レーザーベース
光合成過程に与する軽 の軟X線は、アト秒(1
元素(炭素、窒素、酸素 O)京分の1秒)からフ
など)や遷移金属元素 エムト秒(1000兆分
(チタン、マンガン、ク の1秒)といった極めて
ロム、鉄など)近傍の構 短い時間だけ光る極短パ
造や電子状態などを感 ルス光源である特徴があ
に反映する計測が可能に る。
なる。一方で軟X線光源 これまで、フェムト秒
は大型の放射光施設(仙 光パルスにより分子のダ
台で建設が進む「ナノテ イナミクス計測(199
ラス」など)以外での利 9年ノーベル化学賞、ア
用が進んでいなかった。 ハメッド・ズウェイル)
近年進んだ技術革新に が盛んにおこなわれてい
より、レーザーを用いた るが、時間分解能がアト
軟X線発生が可能にな 秒になることにより、備
り、実験室規模で運用可 電子や内殻電子の量子状

量子科学技術で つくる未来
光による量子制御



研究の特色
である高出力極
短レーザー技術
により、日本の
総電力消費量の
約1000分の1
に相当する1
00億ワットの電
力を光電場が数サ
イクル振動する
間(50兆分の1
秒程度)に集中
させることがで

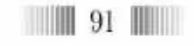
化学反応・量子状態解明に活用

きる。これを直径100
μm(1000分の1)程度の領域で
気体に集めることによ
り、光の波長を短くする
ことが可能になり、紫外
線や軟X線領域における
コヒーレント光を得るこ
とが可能になる。
スペクトル帯域が広く
時間分解能が非常に高い
レーザーによる軟X線光
源は、大型放射光施設の
軟X線光源と相補的な性
質を示し、また、一般的
な実験室の中に納まるコ
ンパクトな装置として有
望視されている。これら
の特色を生かして、極短
パルス軟X線光源利用の
裾野を広げることや量子
技術の実用化に向けた応
用研究への貢献を目指
す。

量子科学技術研究開発機構(QST) 関西
光量子科学研究所 超高速電子ダイナ
ミクス研究プロジェクト 上席研究員 石井 順久

超高速高強度レーザー開発とその分光応用が専門。現在は量子生命
関連の分光計測装置における光源開発やレーザーによる軟X線発生と
水の光化学反応の極初期過程に興味がある。博士(理学)。

量子科学技術で つくる未来
光による量子制御



光(レーザー)技術・操作をする上でレーザ
は、量子技術をさまざまの果たす役割は大き
な面を支えている。光は、本連載(全7回)
「粒子」と「波」の二重は、レーザーを用いた量
子を持つが、レーザーを 子技術の実用化に向けた
利用する多くの場合、 研究、主にレーザーの
「波」の性質が用いられ 「波」の形を制御するこ
らに短くできる。
が發生し、それらをうまく使
うことで、電波と光の境
界であるテラヘルツ波

量子技術を支えるレーザーと計測・理論

量子機能創製 ・2次元物質 ・スピンフォニクス	レーザー加工 ・精密微細加工 ・高効率プラズマ生成	量子生命科学 ・光合成、DNA損傷 ・光診断
-------------------------------	---------------------------------	------------------------------

光・量子基盤技術

超高速分光測定技術 時間分解分光、位相計測、 多次元・非線形分光	理論計算・シミュレーション 電子ダイナミクス、 電磁場(光)伝搬
--	--

高出力レーザー・極短パルス発生技術

波長の異なる波を山の位置(位相)をそろえて足し合わせると短いパルスの波(光)となる。位相によって波形は変わる。

量子技術を支えるレーザー

非線形効果をうまく使
うことで、電波と光の境
界であるテラヘルツ波
程度)から赤外、可視、
紫外(波長100ナノ
メートルは10億分の1)程
度と幅広い波長領域に
おいて、パルス長の限界
である1周期程度の波し
かないパルス光が実現で
き、その1周期内で駆動
される電子の挙動の観測
も可能になっている。
さらに、放射光施設が
得意とする軟X線(数ナ
ノメートル)領域も、実験室規模
のレーザーによる光源が
実現しつつある。レーザ
ーの強みは、パルス幅が
短く、他の波長のレーザ
ーと高精度に時間同期が
取れる点にある。物質内

光を創り、モノ観て操る

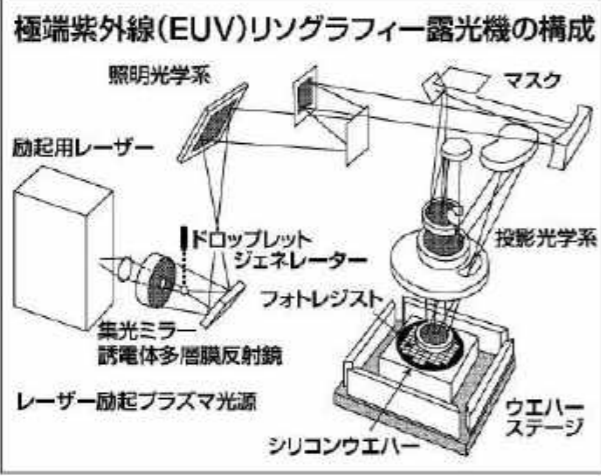
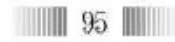
に存在する電子の速い動
きを観測し、制御・操作
することを志向したレー
ザー軟X線光源は、高精
度な構造・電子状態解析
を志向した高精度な次世
代放射光施設(ナノテラ
ス)と相補的となる。
量子科学技術研究開発
機構・関西光量子科学研
究所は、最先端の極短パ
ルスレーザー光源とそれ
を用いた計測技術に加え
、物質内の電子の挙動
をシミュレーションする
技術を有している。それ
らを基盤として、量子機
能性材料の評価や開発、
レーザー加工、量子生命
科学の学理探求、医療応
用を進め、外部機関の研
究者に開かれた研究拠点
となることを目指してい
る。

量子科学技術研究開発機構(QST)量子
技術基盤研究部門 関西光量子科学研究所 板倉 隆二
量子応用光学研究部 超高速電子
ダイナミクス研究プロジェクトリーダー

極短レーザーパルスを用いて、さまざまな物質内の量子レベル
の電子の動きを観測し、制御する研究に従事。博士(理学)。

量子科学技術で つくる未来

光による 量子制御



照明光学系、マスク、投影光学系、シリコンウエハー、フォトレジスト、レーザー励起プラズマ光源、集光ミラー、誘電体多層膜反射鏡、ドロップレットジェネレーター、励起用レーザー

究極のリソグラフィ技術

ナノサイズの電子回路作製

技術は、ナノメートルレベルの「量子の世界」における最先端計測技術を基盤として成り立っている。将来が期待されている量子コンピュータの分野でも、これらの最先端技術の可能性に注目したシリコン量子ビットなどの新技術の研究が進められている。

QSTでは、このような量子技術の今後の微細化における重要性に注目し、加速器技術による大出力、短波長のビシンドEUV光源を用いた、高コヒーレンス光による干渉露光技術や、超短パルス光によるフォトレジストの精細なパターンの形成などの実験、理論・シミュレーション研究を進めている。

(木曜日に掲載)

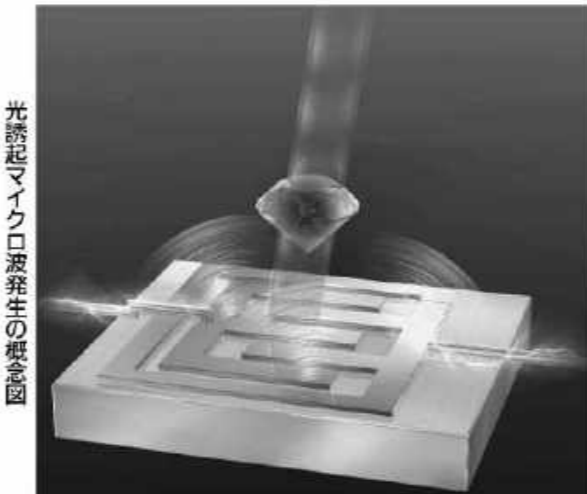


量子科学技術研究開発機構(QST) 関西光量子科学研究所 X線超微細加工 佐々木 明 技術研究プロジェクト 専門業務員

計算機シミュレーションを用い、X線レーザーや極端紫外線リソグラフィ光源を対象として、高温のプラズマ中の原子から発生する光やX線とその応用の理論研究を行っている。博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

光による 量子制御



光誘起マイクロ波発生

送る間にマイクロ波が減衰してしまう。そこで登場するのが光である。レーザーはエネルギーのそろったフォトン(光子)の集まりであり、半導体にあてるとフォトンのエネルギーを吸収して電子電遷が発生する。レーザー強度を特定の周波数で変調させた場合、半導体中に発生する電流もレーザーに合わせ規則正しく増減し、その結果、レーザーの強度変調と同じ周波数のマイクロ波を発生できる。

こうして発生したマイクロ波が量子センサーの読み出しなどに利用できるならば、直接利用できる。

量子を支える光技術

応用範囲広いマイクロ波

実際には、半導体やレーザーの選択、電流を引き出す電極の設計・作製、十分な強度のマイクロ波を発生する技術など多くの開発要素がある。量子科学技術研究開発機構(QST)では量子技術の成功を握るともいえるレーザーを活用した高品質なマイクロ波発生技術の開発を進めている。

(木曜日に掲載)

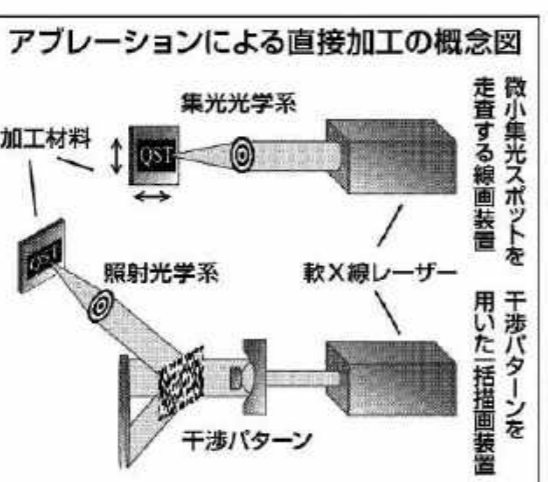


量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所 量子機能創製研究センター センター長 大島 武

宇宙用の太陽電池や電子デバイスの放射線劣化・誤動作や、放射線を活用した材料の機能化、例えば、粒子線によるダイヤモンドや炭化ケイ素(SiC)中の量子ビットや量子センサー形成に関する研究に従事。博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

光による
量子制御



微小集光スポットを走査する線画装置、干渉パターンを用いた括弧装置

アブレーションによる直接加工の概念図

加工材料

集光光学系

照射光学系

軟X線レーザー

干渉パターン

QST

スマート社会に貢献

量子科学技術研究開発機構(QST) 関西光量子科学研究所 X線超微細加工技術研究プロジェクト プロジェクトリーダー

石野 雅彦

軟X線光学素子と軟X線顕微鏡の開発を経て、現在は軟X線レーザーの利用研究に従事している。研究の対象が変わっても、ナノメートルが一貫した研究のキーワードとなっている。博士(工学)



量子科学技術研究開発機構(QST) 関西光量子科学研究所 X線超微細加工技術研究プロジェクト プロジェクトリーダー

石野 雅彦

軟X線光学素子と軟X線顕微鏡の開発を経て、現在は軟X線レーザーの利用研究に従事している。研究の対象が変わっても、ナノメートルが一貫した研究のキーワードとなっている。博士(工学)

情報化社会を支える情 きた。その製造には、原 報通信技術やスマート社 図の回路パターンをシリ 会の基盤をつかさどる入 コンウエハー上に縮小露 工知能技術などを利用す 光するリソグラフィ技 するための手段として、パ 術が利用されている。シ ンコンやスマートフォン リコンウエハー上に塗布 などの電子機器が活用さ した感光材料に焼き付け れている。量子コンピュ た後、化学処理を施すこ ーターが実用化されるこ で目的とするパターン には、社会に流れる情 を得ている。

報量は今よりも飛躍的に 電子回路の微細化に対 増大するだろう。電子情 応するため、リソグラフ 報機器に求められる処理 ーの露光波長の短波長 性能はますます向上す 化が進み、現在は波長10、 5ナノ(ナノは10億分の 一)の極端紫外線(EUV) による半導体回路は、微細化 V)を使ったEUVリソ ンによって性能が向上して グラフイー(本連載シリ

軟X線レーザーで超微細加工

シリーズ第5回(6月25日) ソクラフィーと同様の波 長をもつ軟X線レーザー 長をもつ軟X線レーザー を使って、ナノメートル 高出力レーザーを物質表 面に集光すると、照射部 が気化・蒸発し、表面か ら原子や分子などが飛散 する「アブレーション」 が起こる。

軟X線レーザーによる アブレーションを表面加 工に活用すれば、リソグ ラフイーで必須の化学処 理を行うことなく、低 環境負荷でナノメートル スケールの高精細な電子 回路を基板表面に直接形 成する加工技術の実現が 期待される。

量子科学技術研究開発 機構では、軟X線レーザ

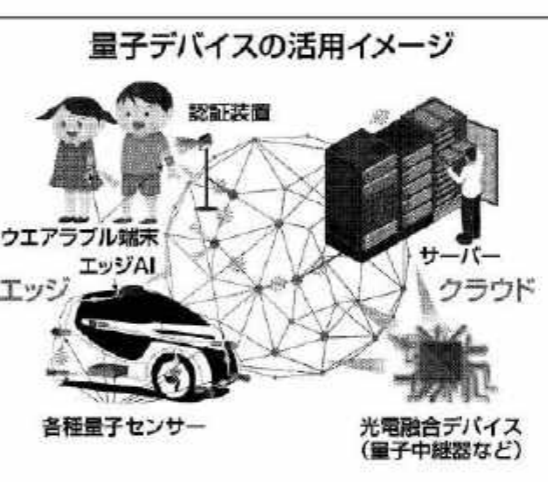
1)を用いて物質表面にナ ノメートルスケールのパ ターンを直接形成するX 線超微細加工技術の開発 研究を行っている。これ までにシリコン表面に2 ナジの深さをもつ穴構造 の直接加工を実現してい る。

さらに技術開発を進め ることで、物質表面にナ ノメートルの「量子サイ ズ」の構造物を加工する ことや、軟X線レーザー のもつ可干渉性を利用し て電子回路などのナノパ ターンを一括描画する加 工技術も実現できる可能 性も秘めている。量子科 学技術の発展とともにス マート社会を支える基盤 技術となる超微細加工の 技術開発を進めている。

(木曜日に掲載)

量子科学技術で つくる未来

量子デバイスに
囲まれる生活



ウェアラブル端末 エッジAI 各種量子センサー

サーバークラウド

光電融合デバイス(量子中継器など)

量子デバイスの活用イメージ

量子技術基盤を活用

で動作することが重要なポイントになる。

量子科学技術研究開発機構(QST)では、量子ビームを用いた精密な量子ビット形成技術をはじめとする世界最先端の量子技術基盤を有しており、それを活用した室温動作可能な量子ビットや量子デバイスの開発を進めている。この連載では、QSTにおけるイオントラップやダイヤモンドスピン欠陥といった量子ビット、フレキシブルな量子デバイス、単一光子源などの研究開発とそれらが目指している応用について紹介したい。本連載を通じて量子デバイスに囲まれる未来の生活について考えを巡らす機会になれば幸いである。

(木曜日に掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子技術基盤研究部門 部門長

河内 哲哉

原子分光を背景に、軟X線レーザーや高強度場科学の研究に従事。2017-22年度まで関西光量子科学研究所長を務める。現在、量子技術イノベーション拠点の一つである量子技術基盤拠点の拠点長として拠点運営にあたっている。博士(工学)

最近話題の最先端の人 モノがなくなり、実空間 工知能(AI)技術を目 (フィジカル空間)に張 の当たり前にして、近い将 り巡らされたセンサーか 来に私たちの生活が大き ら膨大な情報が仮想空間 く変わるのではと感じて (サイバー空間)に集積 いる方も多いと思う。わ ・解析され、実空間に住 が国では、AI技術やI む我々が必要とする情報 0T(モノのインターネ が必要な時に得られるよ ット)技術といった我々 らになる。このような社 の社会の在り方を変える 会の実現には情報を飛躍 可能性を持つ最先端技術 的に高速かつ高効率に処 を取り込むことによって 理することが必須であ 経済発展とさまざまな社 先端技術として量子コン 未来社会「Society 5.0」の実現が進 る量子センサー、量子通 信などの量子技術が注目 されている。

Society 5.0 を集めている。量子コンピュターに ではIoTで全ての人と 量子コンピュターに

身近な量子デバイス

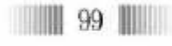
ついでに、極低温にまで の達成や、理化学研究所 冷却した超電導量子ピッ などによる国内初号機の トを用いる方式でGoogle 稼働など、近年急速な発 展による量子超超性 展を見せている。一方で

量子技術を社会全体に広 く浸透させていくために は、私たちの身の回りの さまざまなところで社会 生活を支える最先端の機 器・量子デバイスも必要 になる。

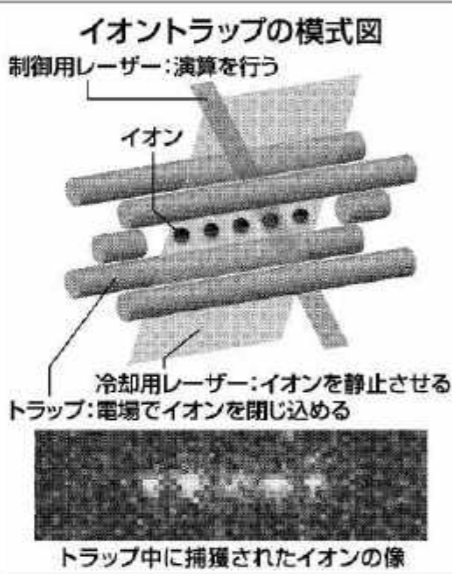
例えば、社会の隅々に 張り巡らされる各種量子 センサーや、量子コンピ ュターが生み出す量子 情報を伝達する量子中継 器や量子受信機、個人情 報を安全に持ち運ぶウェアラブルな量子メモリ などがある。日常的 に身の回りで使用され ているこれらの機器を量子コ ンピュターと同様に極 低温まで冷却させること は現実的ではなく、室温

量子科学技術で つくる未来

量子デバイスに 囲まれる生活



2019年10月に「世 界最高のスーパーコンピュータでさえ1万年かかる計算をわずか3分で」という量子コンピュータの発表結果が、世界的に注目を集めている。これは、量子コンピュータの性能向上が、従来のスーパーコンピュータよりも速く、エラーが少なく、量子科学技術研究 生じやすいため、ノイズ 開発機構(QST)でも 強い量子ビットを開発 量子コンピュータの実 する必要がある。 現に向けた研究・開発を 量子コンピュータが 実現するためにQSTが 行っている。 極微の世界の物理法則 取り組んでいるのは、自



然が作った量子ビットとして利用する。ビットを制御、すなわち「イオン」を用いるイオントラップ方式だ。この方式では、真空中にほぼ静止状態で直線状に並べたイオンを1個1個量子 トラップ中に捕獲されたイオンの像

イオン操り量子コンピュータ

大規模化・高ノイズ耐性両立

量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所レーザー冷却イオン プロジェクト プロジェクトリーダー 鳴海 一雅

イオンビームと固体との相互作用、イオンビームを用いた材料改質・分析に関する研究に従事。現在、イオントラップを用いた量子コンピュータの実現を目指した基礎技術開発を主導。博士(工学)。

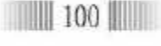


量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所レーザー冷却イオン プロジェクト プロジェクトリーダー 鳴海 一雅

イオンビームと固体との相互作用、イオンビームを用いた材料改質・分析に関する研究に従事。現在、イオントラップを用いた量子コンピュータの実現を目指した基礎技術開発を主導。博士(工学)。

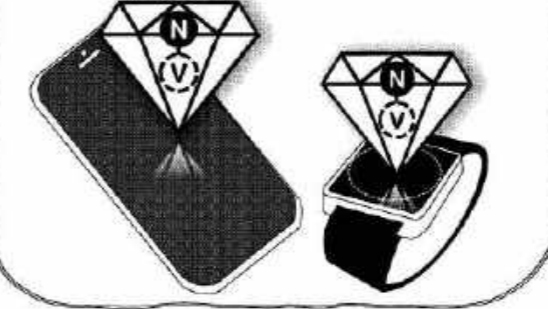
量子科学技術で つくる未来

量子デバイスに 囲まれる生活



世界各国で量子コンピュータの開発が精力的に進められている。Google(グーグル)やなどのポータル・ウェブ 量子科学技術研究開発機構(QST)で取り組んでいる真空室にトランプ ビットを用いる方式や、 量子科学技術研究開発機構(QST)で取り組んでいる真空室にトランプ ビットを用いる方式や、 量子科学技術研究開発機構(QST)で取り組んでいる真空室にトランプ ビットを用いる方式や、

NV量子チップが搭載されたデバイス Diamond Q-chip in your device



ダイヤモンド中の NV センターは室温でスピンという量子性を発現できる極めて特別な性質を持つ。NV センターは量子コンピュータとして の開発が盛んだ。 NV センターをたくさん集めると超高度な磁

ダイヤモンドで情報素子

日常使えるデバイス実現

量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所 量子センシング プロジェクト 研究統括 小野田 忍

イオンビームを用いたダイヤモンド中のスピン欠陥形成・利用に関する研究に従事。現在、ダイヤモンドNVセンターを使った室温動作の量子デバイスを開発している。博士(工学)。

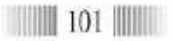


量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所 量子センシング プロジェクト 研究統括 小野田 忍

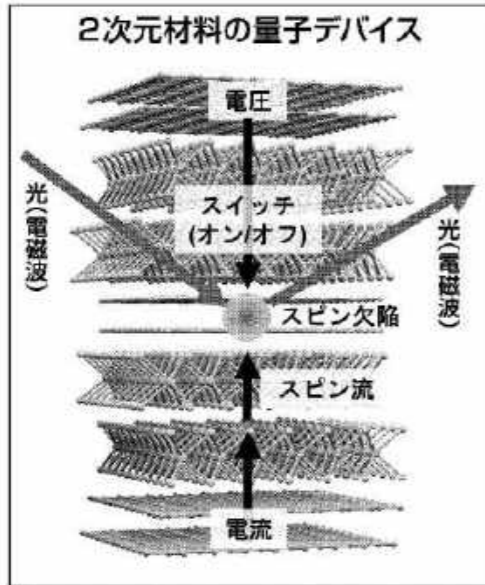
イオンビームを用いたダイヤモンド中のスピン欠陥形成・利用に関する研究に従事。現在、ダイヤモンドNVセンターを使った室温動作の量子デバイスを開発している。博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

量子デバイスに 囲まれる生活



物質と聞くと鉄やガラスなど目に見えるものが思い浮かぶ。物質を原子に近いサイズまで小さくしたものはナノ物質（1ナノ物質は10億分の1メートル）と総称される。ナノ物質は、その形状によって、点状のもの、棒状のもの、シート状のもの、チューブ、シート状のもの、2次元材料（以下、2次元材料）など、非常に多くの種類がある。2次元材料としては、2004年に発見された炭素原子が蜂の巣のような六角形状に結合したグラフェンが有名である。



さらに近年では、さまざまな積み重ね方に、量子が関係する研究も行われている。その中で、デバイスが提唱され始めた2次元材料に例え、量子状態は非常に壊れやすい。また、積層するプロットの種類や積層の順番を変えることで、全体の機能を変えることもできる。さらに、通

実用化へ知見・技術活用

帯の3次元材料は曲げると壊れてしまうが、2次元材料は曲げに強い上、電気伝導性などはあまり低下しないことが確認されている。量子科学技術研究開発機構(QST)では、量子センサーなどに利用できる電子が持つスピントラップやダイヤモンドなどの形成した特殊な欠陥に関する研究を行っている。これらの知見や技術を活用し、量子技術の実用化に向けて、2次元材料をベースとしたフレキシブルでありながら3次元材料で作られたデバイスに負けない、あるいは実現が難しい新規量子デバイスの創製に取り組んでいる。(木曜日に掲載)



量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所 光スピン量子制御プロジェクト 研究統括 **山崎 雄一**

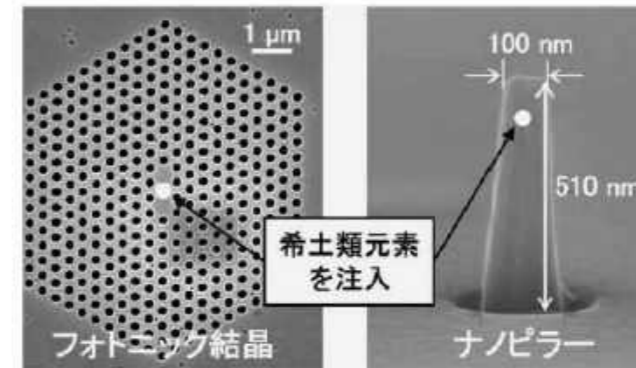
イオンビームを用いた炭化ケイ素および六方晶窒化ホウ素中のスピン欠陥形成・利用に関する研究に従事。現在、2次元材料を使った新規量子デバイスの研究を行っている。博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

量子デバイスに 囲まれる生活



光の強度を小さくして、たった一つの光子、すなわちいくつ、それ以上は小さな単一光子を任意のタイミングで生成し、量子操作される最小単位、すなわち光子は、ためのシステムが必要と空間を光速で移動することになる。ここで、最も重要とができ、室温や大気中となるのが単一光子源でも量子情報を保持する開発である。単一光子源のピン欠陥から別のスピン欠陥へ量子情報を転送する際のつなぎ役として、室温で量子情報技術の実用化にとって極めて重要な役割を担うことが期待されている。



さらに近年では、さまざまな積み重ね方に、量子が関係する研究も行われている。その中で、デバイスが提唱され始めた2次元材料に例え、量子状態は非常に壊れやすい。また、積層するプロットの種類や積層の順番を変えることで、全体の機能を変えることもできる。さらに、通

ナノ構造使い性能向上

ンビーム照射技術を用いて、ナノメートル(ナノは10億分の1)スケールの特殊形状を施したGaNに希土類イオンを精密に注入することにより、希土類の単一光子放出レートや光収集効率を従来よりも20倍以上高めることに成功している。今後、更なる発光レートの向上や電子デバイス化などに向けた研究を進めることで、量子コンピュータや量子暗号通信で用いられるオンチップ量子もつれデバイスや、次世代パワー半導体として期待されるGaN内部の診断を行う量子センサーなど、単一の光子を操るデバイスの実用化に近づけていく。(木曜日に掲載)

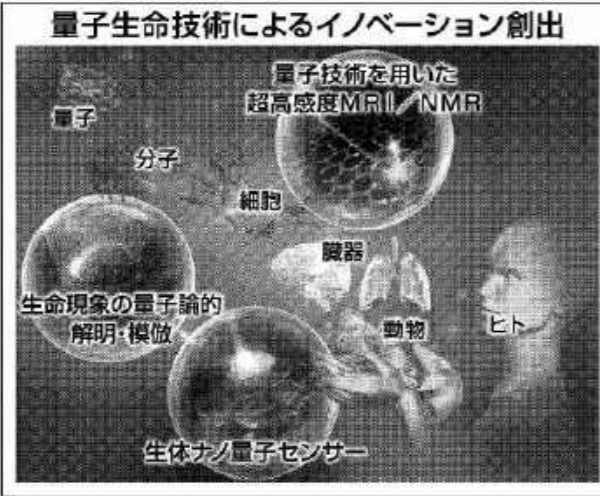


量子科学技術研究開発機構(QST) 高崎量子応用研究所 希土類量子デバイスプロジェクト プロジェクトチーフ **佐藤 真一郎**

イオンビームや電子線を用いた新規量子デバイスの開発に関する研究、特に単一光子源や量子センサーの開発に従事。博士(工学)。

量子科学技術で つくる未来

最先端研究を
身近に届ける



量子生命技術によるイノベーション創出

人材育成と産業との架け橋

量子科学技術の普及活動を推進することを目的としている。



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子生命科学研究所/イノベーションセンター 三枝 公美子 主幹研究員

量子生命科学の開拓者

国の量子技術イノベーターが独自の学問として開拓がはじまり、量子論・21年2月に量子技術イノベーション拠点(QI)から生命全般の根本原理を明らかにすると同時に、医療・工業・情報・農業・エネ

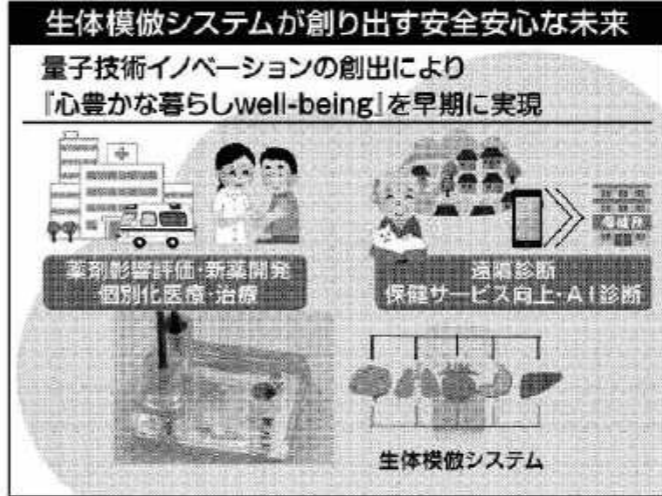
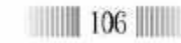
おける量子効果の測定や現象の量子論的説明・生物機能の量子論的メカニズムの解明などの「生命」

それぞれ分野で、基礎研究から技術実証までを踏まえた出口戦略を構築し、次世代を担う若手研究者や技術者の人材育成などを一元的に進めている。

量子生命科学の開拓者として、ユースケース開拓・実証研究へと展開していく。

量子科学技術で つくる未来

最先端研究を
身近に届ける



生体模倣システムが創り出す安全安心な未来

well-being 早期実現

上記の全身を模倣したシステムを社会実装するため、QSTでは「生体



量子科学技術研究開発機構(QST) 量子技術基盤研究部門 高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部 田口 光正 次長

全身モデルで医療進化

私たちの身の回りの化学物質は日々増大してお

QSTでは、手のひらサイズの基板上に微細な

模倣システム創製研究アライアンス」を立ち上げ、専門性が異なる企業間と協同して研究開発を

