



2026年4月9日  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
NTT 株式会社

## 加速器技術の応用で量子デバイスの性能向上手法を発見

～KEK と NTT、長寿命量子メモリ・高感度センサの実現に前進～

### 本発表のストーリー

#### ● Question

量子コンピュータや量子センサは、多様な方式で研究開発が進められています。超伝導方式では、実用化に向けて量子ビットや共振器などの各部品の性能向上が必須ですが、さまざまな困難があり、決定的な改良手法は見つかっていません。

#### ● Findings

素粒子物理学実験や物性実験用の放射光源などの先端加速器に近年用いられている超伝導加速空洞の表面処理技術を、量子技術で利用される三次元空洞共振器用に適用し最適化したところ、共振器の性能指標が歴代最高値の2倍となる約30億を達成しました。これは量子向けの空洞共振器として世界最高水準の性能です。

#### ● Meaning

成果は、1980年代から蓄積されてきた超伝導加速空洞技術の量子応用を切り拓くものであり、高性能な超伝導量子ビットの実現に寄与が期待されるだけでなく、量子情報を長時間保持可能な量子メモリや、ダークマター（暗黒物質）検出にもつながる超高感度のセンシング技術への応用が期待されます。



加速器用の超伝導空洞共振器（左）と量子技術用の超伝導空洞共振器（右）



超伝導加速器の心臓部である空洞共振器の性能を上げる手法を、量子デバイスで用いられるタイプの空洞共振器に適用したところ、この共振器の性能指標が世界最高水準に達しました。粒子加速器の技術が、量子技術の分野でもイノベーションを起こせる可能性を示しています。

## 概要

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構（本部：茨城県つくば市、機構長：浅井祥仁）と NTT 株式会社（本社：東京都千代田区、代表取締役社長：島田 明、以下「NTT」）は共同で、二オブ製の三次元共振器に対して、超伝導加速空洞で開発された表面化学処理と「中温アニーリング」(※1) という手法を適用することで、共振器の性能指標となる内部 Q 値 (※2) が世界最高水準となる約 30 億 (10 億=10 の 9 乗) を達成しました。また中温アニーリング後の二オブ製共振器は、冷却サイクルや大気暴露に対して性能が安定しており、実用上での利点があることも明らかになりました。本成果は、安定して高い性能を発揮する超伝導量子ビットの開発や、量子情報を長時間保持する量子メモリ、共振器特性を活かしたセンシング技術への応用が見込まれ、粒子加速器分野で長年培われた知見が量子技術の分野でも有効であることを示しています。

本成果は、米国科学誌「Physical Review Applied」の Editors' Suggestion に選ばれ、2026 年 3 月 24 日にオンライン版に掲載されました。

### ※1.中温アニーリング:

加速空洞研究で古くから採用されている熱処理として、700-900℃で数時間加熱する高温アニーリングと 100℃程度で 48 時間加熱する低温ベークがあります。比較的最近になって、それらの中間の温度で行う熱処理に注目が集まりつつあり、中温アニーリングや中温ベークと呼ばれています。

### ※2.Q 値:

共振器の性能を表す指標であり、共振の周波数を共振器のエネルギー損失率で割ったものに対応します。Q 値が高いほどエネルギー損失率が低く、共振器に蓄えられたエネルギーを長時間保持できることを意味します。また Q 値は共振の周波数を共振ピークの半値幅で割った値としても定義され、Q 値が高いほど共振器のピークは鋭くなり、高い Q 値の共振器は周波数敏感なセンサとして利用できます。

## 背景

共振器は、電磁波の特定の周波数だけに強く応答して、信号を選別することができる部品です。現代の通信では、必要な信号を選別するフィルタや、周波数の基準を作る回路などに広く使われています。

基礎研究でも共振器は広く用いられます。粒子加速器では、数ギガヘルツの電磁波（マイクロ波）で共振する「加速空洞」と呼ばれる金属製の筒に高周波電力を入力し、空洞内の電場から電子や陽子など電荷を持つ粒子がエネルギーを得て加速されます。このとき空洞の内壁には高周波磁場に対応した強い電流が流れます。材料に電気抵抗があると、入力した電力の一部が損失となって発熱するため、通常金属で作製された空洞では冷却や消費電力が課題になります。

この問題を解決するため、一部の粒子加速器では極低温で超伝導となる材料で空洞を作ります。ただし、直流でゼロ抵抗になる超伝導体でも、マイクロ波領域では有限の表面抵抗（※3）を持ち、実際には損失ゼロでの運転は不可能です。そのため表面抵抗の逆数に比例する品質係数（Q 値）を指標として、加速空洞の性能を評価します。Q 値を高くするには、空洞の表面処理が重要であることがわかっており、1980 年代から長年の蓄積で、化学研磨や電解研磨、超音波洗浄、超純水による高圧洗浄のほか、空洞を 100℃程度で加熱する「ベーキング」や、より高温で加熱する「アニーリング」などさまざまな手法が開発されてきました。

### ※3.表面抵抗

超伝導体の特徴として、直流電流に対してゼロ抵抗を示すことが知られていますが、高周波の交流電流に対しては有限の抵抗値を示します。高周波での表面抵抗には、超伝導の標準的な理論である BCS 理論から導かれる BCS 抵抗成分（温度低下とともに指数関数的に減少）と、欠陥や不純物などの表面状態や環境磁場に依存する残留抵抗成分の2種類が寄与します。表面処理による共振器の高Q化では、いかに残留抵抗成分を低くできるかが鍵になります。

近年、量子コンピュータをはじめとする量子情報処理や、量子センシングといった量子技術が注目されています。さまざまな物理プラットフォームで量子技術の実装が進んでおり、超伝導方式はその一つです。超伝導量子技術では非常に微弱なマイクロ波を扱い、その基盤として共振器が用いられており、損失を小さくすること（Q 値を高めること）が重要です。

超伝導量子と加速器はいずれも、超伝導とマイクロ波という共通点があります。一方で、加速空洞に比べるとデバイスが非常に小さいことや、動作温度が加速器よりさらに低いこと、内部の電場が加速空洞に比べて非常に弱いことなど、条件が大きく異なるため、連携は限定的でした。しかし近年、量子技術側で損失低減と安定化が重要課題となり、加速器分野で体系化された表面処理・評価技術が応用可能な知見として注目され、連携が加速しています。

## 技術のポイント

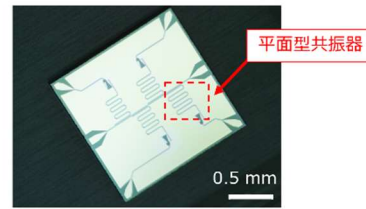
### 1. ニオブ製の三次元同軸型共振器

超伝導量子分野で使われる共振器には、チップ上に作製される平面型と、体積は大きいが高い性能が得られる三次元空洞型の2種類があります。前者は積層化・微細化に適しているため量子チップ内で利用され、後者は超伝導デバイスの検証や量子メモリ、センシングなど、用途に応じて使い分けられます。本研究では三次元空洞型の中でも同軸型の構造を採用しました。共振器の性能を維持しながら超伝導量子ビットと結合させることが可能で、高いQ 値を活かした応用が期待できるためです。従来、量子応用向けの三次元空洞における共振器の素材は、アルミニウムが用いられることが一般的でしたが、本研究では量子分野と加速器分野の双方で実績のあるニオブを採用しました。

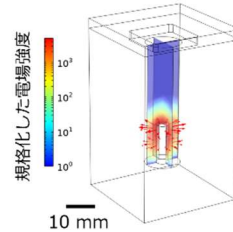
構造	平面型	同軸型	半球/球型 (加速空洞など)
内部Q値の最高性能	× ( $\sim 10^7$ )	○ ( $\sim 10^9$ )	◎ ( $\sim 10^{11}$ )
体積	◎	○	×
量子ビットとの統合	◎	○	△

材質	アルミニウム	ニオブ
超伝導転移温度	1.2 K	9.2 K
内部Q値の最高性能	$1.2 \times 10^8$	$3 \times 10^9$ (量子分野) $1 \times 10^{11}$ (加速器)
製造コスト	◎	○
表面の品質	×	○

平面型



同軸型



球型 (加速空洞)

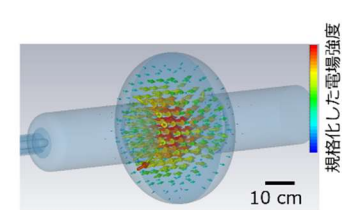


図1 共振器の構造と素材の比較表：(上) 超伝導量子デバイスで用いられる共振器の各構造の比較。今回採用した同軸型の構造は、共振器自体の性能と量子ビットとの結合性のバランスが取れた構造となります。(下) 超伝導量子デバイスで用いられる素材の比較。コストや取り扱いの面からアルミニウムがよく使われるが、本研究では加速器分野で蓄積した処理手法を活用できるニオブを採用しました。(右) 各構造の共振器のイメージ図。三次元構造の共振器には電場強度のカラープロットと電場の向きを表す矢印を示しています。

## 2. 加速器分野で開発された「中温アニーリング法」

高い Q 値を達成するために、超伝導加速空洞の製造時に広く用いられる表面処理手法（※4）を微修正し、同軸型共振器に適用しました。具体的には、化学研磨と高温アニーリング処理、仕上げの化学研磨から成る加速空洞における標準的な下処理に加えて、真空中で 600℃程度に加熱する「中温アニーリング」処理を行いました。2018 年頃から始まった加速空洞における一連の研究により、300℃-600℃の中温アニーリングによって表面抵抗が下がりうるということが明らかになっており、中でも 2022 年の研究で 600℃は残留表面抵抗を下げるという報告がありました。しかしながら、加速空洞への応用上は、量子分野とは異なる 2K 程度の温度において高い Q 値が得られることと、高い Q 値を維持しつつどれだけ大きな電場に到達できるかが重要であり、これらの要求を満たして最適な性能を出す 300℃程度の中温アニーリングに注目が集まっており、600℃での効果は詳しく調べられていませんでした。さらに、そのメカニズムは未解明となっており、非常に弱い電場で動かす超伝導量子デバイスで効果があるかは不明なままでした。本研究の結果、600℃の中温アニーリングによってニオブ表面の酸化物の組成が変化して、損失の大きい酸化物が減少していること、超伝導量子デバイスが動作するような非常に弱い電場でも効果的な手法であることが明らかになりました。

### ※4. 加速器空洞の表面処理プロセス

ニオブ材料の機械加工などで生じた破損や汚れを取り除くために、フッ化水素酸、硝酸、リン酸を混ぜた薬液で表面を 0.1mm ほど溶かして除去する化学研磨作業を実施します。また加速空洞では、低温に冷やした際に性能劣化の原因となるニオブに入り込んだ水素を取り除き、高い電場でエネルギー損失の原因となる磁束トラップ現象を防ぐために、真空中で 900℃まで 3 時間加熱する「高温アニーリング」と呼ばれる工程が行われます。高温アニーリング後には表面に不純物が浮き出てきたり、付着したりすることがあるため、再び薬液での短時間処理を実施し、表面を 0.005mm 程度化学研磨にて除去します。加速器空洞の製造では、非常に滑らかな表面が求めら

れるため、電解研磨や高圧水洗浄と呼ばれる特殊な工程やクリーンルームでの組立工程が含まれるが、本研究では省かれています。

## 研究の概要

KEK と NTT の研究チームは、加速器用空洞共振器での成熟した技術を用いて量子向けの同軸型共振器の表面処理を最適化し、性能を上げることに取り組みました。量子向けの共振器は非常に弱い電場下で動作するため、材料内部や金属表面の酸化物中に存在する二準位欠陥（※5）によるエネルギー損失が大きな問題となります。

### ※5.二準位欠陥

固体中の微視的な構造の乱れや電子状態の不均一性などのさまざまな欠陥に由来して生じる、二つのエネルギー状態を持つ量子系としてふるまう欠陥。超伝導量子デバイスに含まれるジョセフソン接合の絶縁体や超伝導の表面酸化膜に含まれていて、量子デバイスではエネルギー損失の原因となる。加速空洞のような非常に強い電磁場下では二準位欠陥が励起状態で飽和されるため、二準位欠陥によるエネルギー損失は問題となりません。

はじめに化学研磨、高温アニーリング、仕上げの化学研磨という加速空洞用の下処理の簡略版を実施したところ、20 ミリケルビンの極低温かつ電磁場のエネルギーを担う光子が 100 個程度という非常に弱い電場の条件下で、内部 Q 値 ( $Q_{\text{int}}$ ) が、同軸型共振器の世界記録と並ぶ約 10 億に達しました。次に中温アニーリングを適用したところ、460℃、600℃条件の順に性能が上がり、600℃では内部 Q 値が約 30 億に達することを確かめました（図 2, 図 3）。

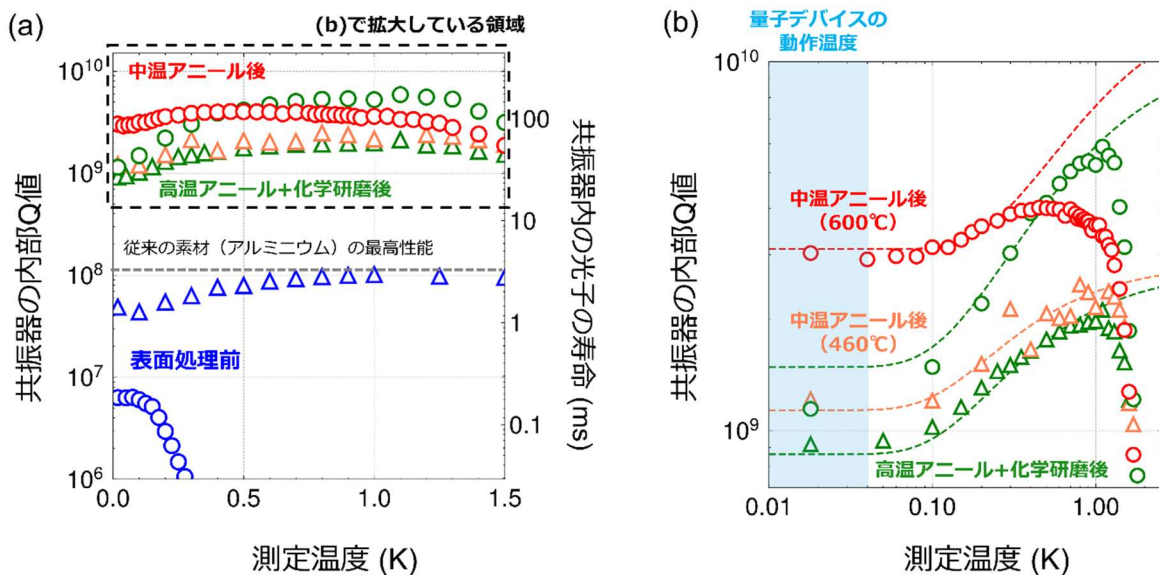


図 2 表面処理による性能改善の様子：(a) 各処理の前後における空洞共振器の内部 Q 値と測定温度の関係。加速空洞の手法に準拠する下処理を実施することで、処理前と比べて内部 Q 値が大きく改善して約 10 億に達し、中温アニールによってさらに改善することが分かります。(b) 加速空洞の手法に準拠する下処理後および中温アニール後の結果を抜き取ったもの。超伝導量子デバイスが動作する 20 ミリケルビンの極低温では、600℃アニール条件が最も高い内部 Q 値（約 30 億）を達成しています。破線は二準位欠陥による損失モデルによるフィッティング曲線を示しています。

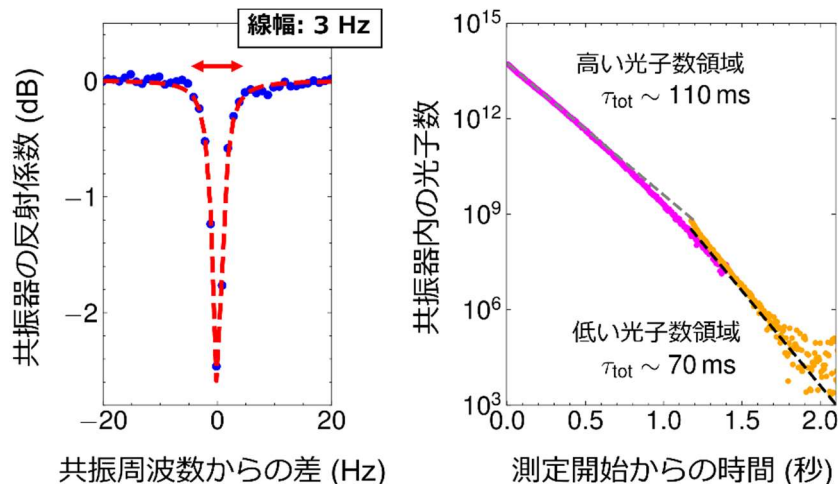


図3 共振器の性能測定結果：(左) 信号の反射測定から共振を測定した様子。(右) 共振器中の光子数（エネルギー）が減衰していく様子から、光子の寿命を測定した結果。共振器以外の部分の測定系に由来した損失の効果も含めて、100 ミリ秒程度の寿命である確認できます。

本研究で確認された内部 Q 値の値（約 30 億）は従来の同軸型共振器の最高記録の 2 倍に当たり、共振器中の光子が約 0.1 秒（90 ミリ秒）量子状態を維持できることを意味します（図 3）。超伝導量子ビットが量子状態を維持できる時間（コヒーレンス時間）は現在、最高で 1 ミリ秒程度です。共振器とは直接比較できませんが、90 ミリ秒という時間は超伝導量子デバイスではかなり長い時間といえます。

また中温アニリング後の共振器は、冷却・復温の繰り返しを行ったり、空気に触れさせたりしても内部 Q 値が大きく下がらないことも分かりました（図 4）。これまでのニオブ製共振器は、表面処理後の大気暴露や冷却・復温により性能が落ちる傾向がありました。これは今回の処理手法が実用に供することを示しており、ニオブ製共振器の実用化に向けた大きな進歩です。

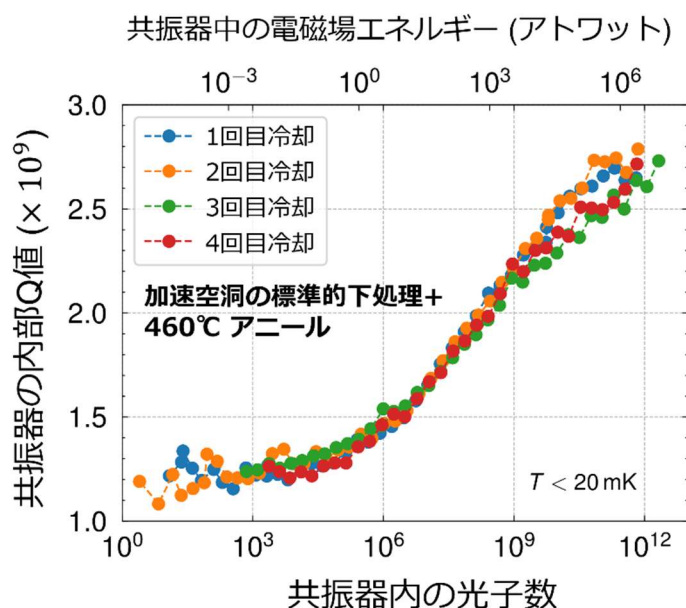


図4 中温アニール後の空洞共振器の安定性：460°Cアニール後の空洞共振器を冷却・復温させて何度も性能評価を行った実験結果。各測定の間には実験に用いる冷凍機の真空を破って大気開放しており、大気暴露や冷却・復温しても性能が変わらないことが分かります。

共振器性能向上の理由を調べるため、処理前後のニオブ表面を X 線光電子分光法（※6）で分析を行ったところ、表面のニオブ酸化物（※7）の様子が、中温アニーリングによって変化していることが分かりました。中温アニーリング後には、Q 値低下の要因になる五酸化ニオブが減少し、下層の酸化ニオブが成長していることが分かり、この違いが性能向上につながっている可能性があります。

#### ※6. X 線光電子分光法

固体表面に X 線を照射し、試料表面から放出される光電子のエネルギーを観測することで、表面から数ナノメートルの範囲の元素の種類や組成、化学結合状態を調べる実験手法。

#### ※7.ニオブ酸化物

ニオブは大気中で自然に酸化され、表面から順に五酸化ニオブ（ $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ）、酸化ニオブ（ $\text{NbO}$ ）、ニオブ金属（ $\text{Nb}$ ）の順に、ニオブ原子一つに対して酸素の数が多い酸化物が形成されます。ニオブ金属をそのまま大気中に放置すると、厚さ数ナノメートルの五酸化ニオブが形成される一方で、酸化ニオブは1ナノメートル以下の薄い層しか形成されない。五酸化ニオブは二準位欠陥を多量に含み、損失の原因になりうることが知られています。

## 今後の展望

本研究で確立された手法は加速空洞に特有の高圧洗浄やクリーンルーム作業のような工程が不要で、ニオブを使った超伝導量子ビットを作る既存のプロセスとも比較的簡単に組み合わせることができます。今後、レシピを最適化、簡略化していくことで、三次元空洞共振器性能のさらなる向上につなげるだけでなく、長寿命超伝導量子ビットの実現や、積層化・集積化に有利な平面型共振器への応用が期待されます。

今回の研究によって作成可能になった空洞共振器を利用して、さまざまな応用への活用も期待されます。空洞共振器の内部 Q 値が高いということは、空洞中の電磁場のエネルギーを担う光子が量子状態を維持する時間が長くなることを意味し、計算中や通信中の量子状態を蓄えておく「量子メモリ」の実現可能性を広げることになります。

また共振器の Q 値が高いという特性を生かした、センサへの応用も考えられます。Q 値が高い共振器は追加の損失に敏感であり、かつ鋭い共振ピークを持つという性質を生かして、材料の損失源の検出、解明などを通じて超低損失材料の開発への活用が期待できます。他にも、超伝導共振器を用いて、宇宙に満ちていると考えられているダークマター（暗黒物質）を検出しようという実験も進められています。この実験では、Q 値が上がることで検出感度の向上に直接つながるほか、共振器内に量子特有の状態を用意することで検出感度を大幅に向上できるとされており、非加速器素粒子実験への貢献も期待されます。このように、同様の極低温下で低損失が求められるさまざまな応用および基礎研究への貢献が期待されています。

## 研究グループ

NTT 株式会社 物性科学基礎研究所

竹中 崇了（研究主任）、水野 皓介（リサーチアソシエイト：研究当時）、Imran Mahboob（主

任研究員)、齊藤 志郎 (上席特別研究員)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

久保 毅幸 (助教)、井上 均 (研究支援員)、佐伯 学行 (教授)

### 各機関の役割分担

- ・ NTT 株式会社：三次元空洞共振器の設計、製作および低温測定、表面分析の実施
- ・ 高エネルギー加速器研究機構：三次元空洞共振器の表面処理の実施

### 研究者からひとこと

KEK の久保毅幸さん



基礎物理学研究は、実験機器に極限性能を求めるがゆえに、その過程で多方面の技術革新を促してきました。超伝導加速空洞も、高エネルギー素粒子実験を実現するために、世界中で数十年にわたる性能向上の努力が重ねられてきたものですが、その過程で高 Q 値化技術を含む多様な表面処理技術が開発・確立されてきました。特に高 Q 値化の追求は、今では高エネルギー素粒子実験を離れ、先端光源用超伝導加速器の実現に向けた主要な研究テーマとなっています。今回の成果は、そうした超伝導加速空洞技術の応用を、量子技術という非加速器分野へと切り拓くものです。

NTT の竹中崇了さん



超伝導量子技術では、量子ビットの高性能化やセンシングへの応用に向けて物質科学的な側面への注目度が高まっています。今回超伝導材に関する深い知見を有する KEK さんとの、研究分野の壁を超えた協力で世界最高水準の性能を達成できたことは、物質からのアプローチが非常に有効であることを改めて示しています。

### 本研究への支援

本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) ムーンショット型研究開発プログラム目標 6「2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」(JPMJMS2067)、日本学術振興会 科学研究費助成事業 「研究活動スタート支援 (課題番号: JP25K23386)」の支援により実施されました。

### 論文情報

タイトル: Three-Dimensional Niobium Coaxial Cavity with 0.1-second Lifetime

著者: T. Takenaka, T. Kubo, I. Mahboob, K. Mizuno, H. Inoue, T. Saeki, and S. Saito

雑誌名: Physical Review Applied

DOI: <https://doi.org/10.1103/5nf2-tjb9>

## お問い合わせ先

---

### <研究内容に関すること>

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設 応用超伝導加速器イノベーションセンター 助教 久保 毅幸

Tel : 029-864-5205

E-mail : [kubotaka@post.kek.jp](mailto:kubotaka@post.kek.jp)

### <報道担当>

高エネルギー加速器研究機構 広報室

Tel : 029-879-6047

E-mail : [press@kek.jp](mailto:press@kek.jp)

NTT 株式会社

先端技術総合研究所

広報担当

E-mail : [nttrd-pr@ml.ntt.com](mailto:nttrd-pr@ml.ntt.com)