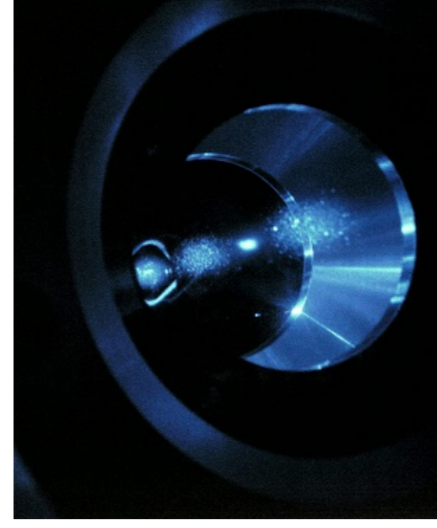


# 光格子時計

ツイート いいね 0

国際単位系の基本単位のひとつである時間の単位「秒」(SI秒)は、現在セシウム133のマイクロ波遷移に基づいて定義されています。近年、原子の光学遷移を利用した原子時計(光時計)の性能がSI秒を信号として取り出せるセシウム原子時計(セシウムのマイクロ波遷移を利用した原子時計)の性能を一桁以上上回ることが明らかになりました。このことを受け、セシウムのマイクロ波遷移から原子の光学遷移へのSI秒の再定義が現在検討されています。



磁気光学トラップ中のストロンチウム原子集団

2006年10月、国際度量衡委員会(CIPM)はストロンチウム87の波長698 nmの光学遷移を秒の二次表現(SI秒の再定義の候補と認められた原子遷移のリスト)に追加することを決定しました。また、CIPMは各原子遷移の推奨周波数値を決定しています。NICTで開発されたストロンチウム光格子時計の測定結果は、2012年9月に開催されたCIPM以降、ストロンチウム87の光学遷移の推奨周波数値決定に貢献しています。



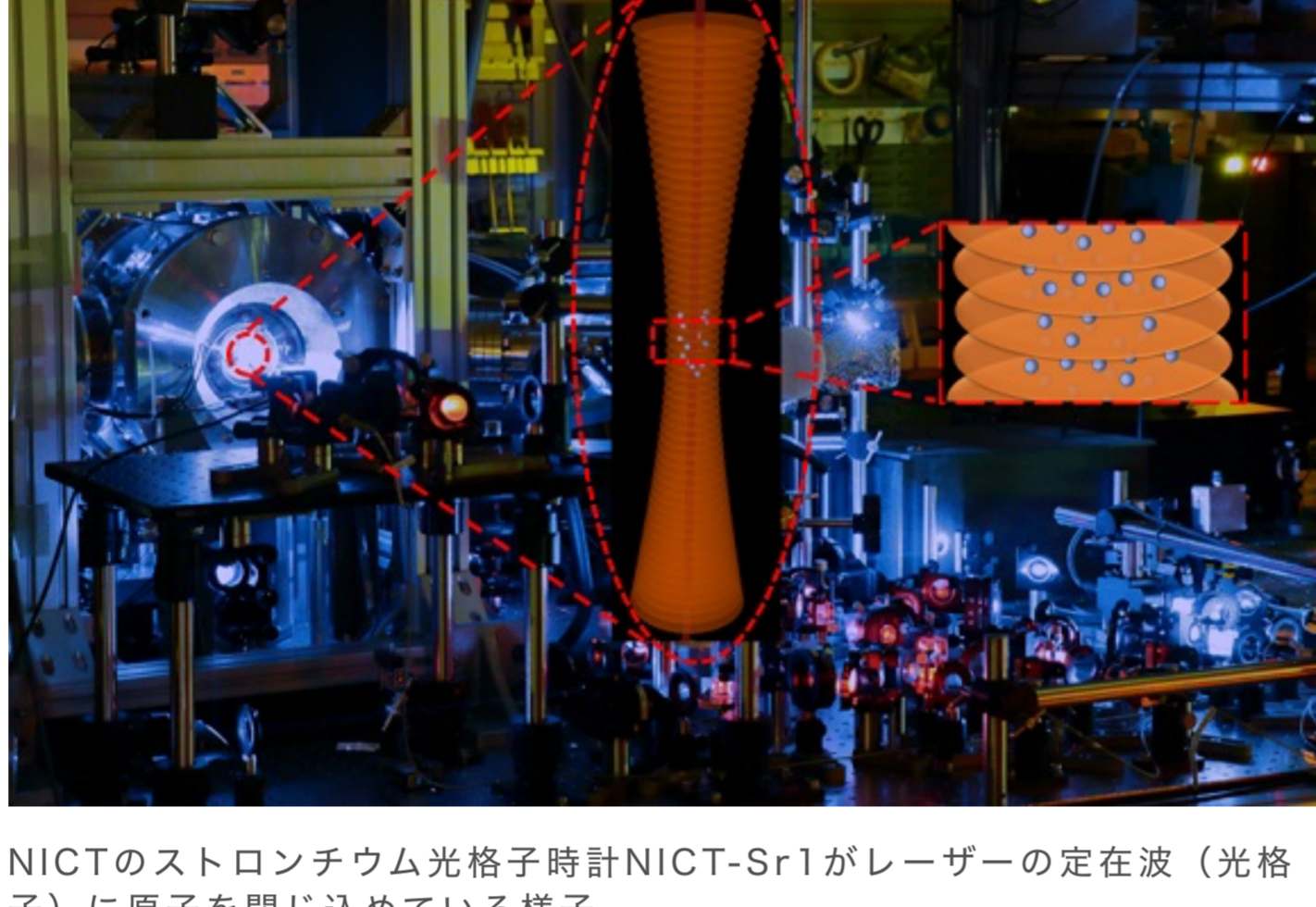
VLBIを用いた日伊間国際光時計比較において中核として活躍した鹿島34 mアンテナ

周波数標準として、さらにはSI秒の新しい定義として認められるには、どこでも同じ測定結果が得られる必要があります。これを実証するために、時空標準研究室では多くの異なる方法で遠隔地にある光時計とNICTのストロンチウム光格子時計の比較を実施しています。例えば、2011年の光ファイバリンクを利用した東京大学のストロンチウム光格子時計との比較、2013年の静止衛星を利用したドイツ物理工学研究所(PTB、ドイツの国立計量研究所)のストロンチウム光格子時計とイッテルビウム単一イオン光時計との比較、

2017年の同じく静止衛星を利用した韓国標準科学研究院(KRIS, 韓国の国立計量研究所)のイッテルビウム光格子時計との比較があります。2020年には、超長基線干渉計(VLBI)を利用して、イタリア国立計量研究所(INRiM)のイッテルビウム光格子時計と比較しました。このように、国内の近距離に留まらず、大陸間のスケールで遠隔地にある光時計の周波数の整合性を検証しています。

2016年、NICTは光時計を利用した連続時刻実信号の生成に世界に先駆けて成功しました。信頼性の高い連続運用を実現する水素メーザー原子時計を大元の信号に採用し、その出力周波数を光格子時計で計測して、その結果をもとに周波数調整することで、5か月間の試験運用の間、高精度な時刻実信号を生成しました。また、この運用期間、この時刻の刻み幅(歩度)は、協定世界時(UTC)の歩度よりもSI秒に近いことが示されました。そして、2021年からこの高精度時刻実信号生成を再開し、現在の日本標準時はこの光格子時計に基づいた時刻信号を参照することで、協定世界時などの他の標準時刻に依存しない自立した、かつ、高精度化された標準時刻として運用しつつあります。

2018年11月、NICTのストロンチウム光格子時計(NICT-Sr1)はフランスのバリ天文台のストロンチウム光格子時計に続いて、光周波数標準としては世界で二例目となる二次周波数標準(SI秒を実現するセシウム一次周波数標準(高精度セシウム原子時計)以外の原子遷移を用いた、協定世界時の校正が認められる周波数標準)に認められています。同年12月から、NICT-Sr1は協定世界時の基になる国際原子時(TAI)の校正データを国際度量衡局に報告することで、TAI校正、つまり国際標準時刻の維持及び高精度化に貢献しています。



NICTのストロンチウム光格子時計NICT-Sr1がレーザーの定在波(光格子)に原子を閉じ込めている様子

## 参考文献

- 1) H. Hachisu, N. Nemitz and H. Ito, 光格子時計を基準に刻む標準時刻, [NICT News 494 4](#) (2022)
- 2) N. Nemitz, T. Gotoh, F. Nakagawa, H. Ito, Y. Hanado, T. Ido and H. Hachisu, **Absolute frequency of <sup>87</sup>Sr at 1.8 × 10<sup>-16</sup> uncertainty by reference to remote primary frequency standards**, [Metrologia 58 025006](#) (2021)
- 3) M. Pizzocaro, M. Sekido, K. Takefuji H. Ujihara, H. Hachisu, N. Nemitz, M. Tsutsumi, T. Kondo, E. Kawai, R. Ichikawa, K. Namba, Y. Okamoto, R. Takahashi, J. Komuro, C. Clivati, Filippo Bregolin, P. Barbieri, A. Mura, C. Cantoni, G. Cerretto, F. Levi, G. Maccaferri, M. Roma, C. Bortolotti, M. Negusini, R. Ricci, G. Zacchiroli, J. Roda, J. Leute, G. Petit, F. Perini, D. Calonico and T. Ido, **Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry**, [Nature Physics 17, 223](#) (2021)
- 4) N. Ohtsubo, Y. Li, N. Nemitz, H. Hachisu, K. Matsubara, T. Ido, and K. Hayasaka, **Frequency ratio of an <sup>115</sup>In<sup>+</sup> ion clock and a <sup>87</sup>Sr optical lattice clock**, [Opt. Lett. 45, 5950-5953](#) (2020)
- 5) H. Hachisu, F. Nakagawa, Y. Hanado and T. Ido, **Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock**, [Sci. Rep. 8 4243](#) (2018)
- 6) M. Fujieda, SH. Yang, T. Gotoh, SW. Hwang, H. Hachisu, H. Kim, YK. Lee, R. Tabuchi, T. Ido, WK. Lee, MS. Heo, CY. Park, DH. Yu and G.Petit, **Advanced Satellite-Based Frequency Transfer at the 10<sup>-16</sup> Level**, [IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control 65 973](#) (2018)
- 7) H. Hachisu, G. Petit, F. Nakagawa, Y. Hanado and T. Ido, **SI-traceable measurement of an optical frequency at the low 10<sup>-16</sup> level without a local primary standard** [Opt. Express 25, 8511](#) (2017)
- 8) H. Hachisu, G. Petit and T. Ido, **Absolute frequency measurement with uncertainty below 1 × 10<sup>-15</sup> using International Atomic Time**, [Appl. Phys. B 123, 34](#) (2017)
- 9) H. Hachisu and T. Ido, **Intermittent optical frequency measurements to reduce the dead time uncertainty of frequency link**, [Jpn. J. Appl. Phys. 54, 112401](#) (2015)
- 10) T. Ido, 光格子時計の遠隔地間直接比較 (Direct comparison between optical lattice clocks), [応用物理学会誌 84巻 第3号](#) (2015)
- 11) H. Hachisu, M. Fujieda, S. Nagano, T. Gotoh, A. Nogami, T. Ido, S. Falke, N. Hünemann, C. Grebing, B. Lipphardt, C. Lisdat and D. Piester, **Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000km**, [Opt. Lett. 39 4072](#) (2014)
- 12) T. Ido and M. Fujieda, 時刻・周波数標準の遠距離比較・伝送技術の現状と将来 (Status and future of long-distance comparisons and transmission technology for time and frequency standards), [日本物理学会誌 68巻第4号](#) (2013)
- 13) A. Yamaguchi, N. Shiga, S. Nagano, Y. Li, H. Ishijima, H. Hachisu, M. Kumagai and T. Ido, **Stability transfer between two clock lasers operating at different wavelengths for absolute frequency measurement of clocks transition in <sup>87</sup>Sr**, [Appl. Phys. Express 5, 022701](#) (2012)
- 14) A. Yamaguchi, M. Fujieda, M. Kumagai, H. Hachisu, S. Nagano, Y. Li, T. Ido, T. Takano, M. Takamoto and H. Katori, **Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the 10<sup>-16</sup> Uncertainty**, [Appl. Phys. Express 4, 082203](#) (2011)

## 標準時刻・周波数発生プロジェクト

- 日本標準時
- 日本標準時の歴史
- JJY - 標準電波
- JJY - 電波時計のよくあるご質問
- JJY - 標準周波数の周波数偏差公開データ
- JJY - 標準電波で送信する時刻符号
- JJY - QSLカードコレクション
- 日本標準時の分散化
- 非常時・不具合時の運用及び免責について
- セシウム一次周波数標準器
- 光格子時計
- 光時系
- 首都圏光ファイバリンク
- Multi-GNSS時刻比較

## NICTについて

- 理事長挨拶
- 役員紹介
- 組織
- 研究所長紹介
- NICT憲章
- 目標・計画
- 事業報告書
- 評価
- 公開情報
- 所在地案内
- 沿革
- NICTフェロ紹介
- アドバイザリーコミッティー
- NICT PRムービー『Nのいる未来』

## 研究成果

- 研究データ
- 知財一覧
- 論文一覧
- 受賞一覧
- NICTシズ集
- 技術活用一覧
- 標準化活動一覧
- 出版・書物一覧
- サービス・アプリ一覧

## 研究紹介

- 電磁波研究所
  - 電磁波伝搬研究センター
  - 電磁波標準研究センター
  - 電磁波先進研究センター
- ネットワーク研究所
  - フォトニクスICT研究センター
  - ワイヤレスネットワーク研究センター
  - レジリエントICT研究センター
- サイバーセキュリティ研究所
  - サイバーセキュリティネクス
  - ナショナルサイバートレーニングセンター
  - ナショナルサイバーオペレーションセンター
- ユニバーサルコミュニケーション研究所
  - 先進的音声翻訳研究開発推進センター
  - データ駆動知能システム研究センター
  - 統合ビッグデータ研究センター
- 未来ICT研究所
  - 神戸フロンティア研究センター
  - 小金井フロンティア研究センター
  - 脳情報通信融合研究センター
- Beyond 5G研究開発推進ユニット
  - テラヘルツ研究センター
  - 量子ICT協創センター

## オープンイノベーション推進本部

- 設備・データを使いたい
  - 総合テストベッド
  - AIデータテストベッド
  - 研究データ
  - B5G共用施設設利用(委託研究)
  - 研究施設等の外部利用
- 連携・相談したい
  - 共同研究を受けたい
  - 研究を委託したい
  - 国際連携したい
  - 相談したい(技術相談)
  - 外部連携の事例
- 研究成果を使いたい
  - NICTシズ集
  - ニューノーマル時代に資する技術シズ集
  - 研究成果/知財/標準化
- 支援を受けたい
  - スタートアップ支援
  - 情報バリアフリー
  - 各種支援制度
- Beyond 5G研究開発促進事業
  - Beyond 5G研究開発促進事業(ポータル)
  - Beyond 5G研究開発促進事業(委託研究)
  - B5G共用施設設利用(委託研究)

## 採用

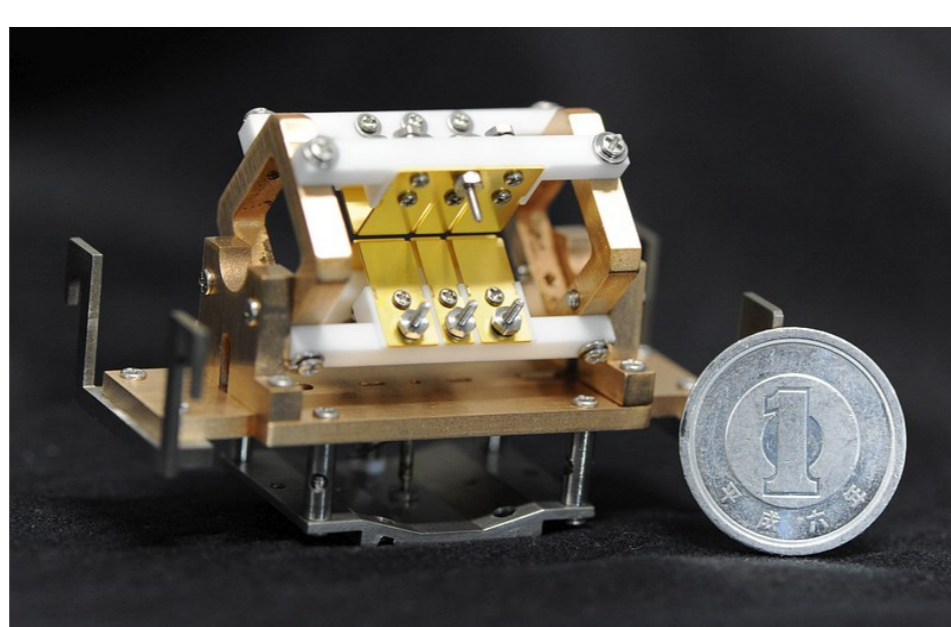
- 研究職・研究技術職採用
  - 総合職・有期一般職採用
  - インターンシップ
  - 障がい者採用
- 広報
- 新着情報
  - プレスリリース
  - お知らせ
  - オープンハウス一覧
  - 出版物・発行書籍
  - パンフレット
  - Youtube動画
  - Twitter
  - Facebook
  - Instagram
  - 展示室のご案内
  - バーチャル展示室のご案内
  - 本部展示室見学ツアーのご案内
  - ホワイトペーパー
  - NICT先端研究
  - NICT PRムービー『Nのいる未来』
- 公募・調達
- 公募情報
  - 調達
- イノベーションデザインイニシアティブ(IDI)
- ホワイトペーパー
  - 活動報告書



# In<sup>+</sup>イオン光周波数標準の研究開発

ツイート いいね! 0

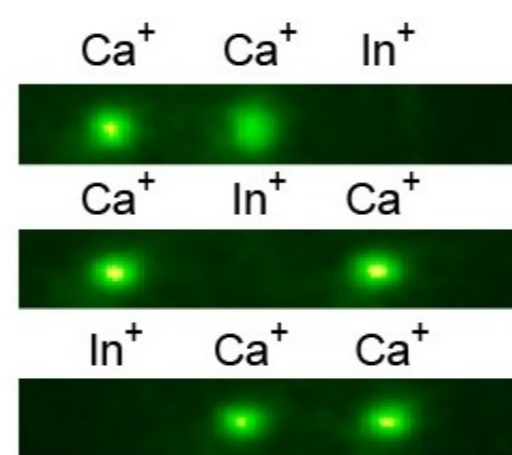
イオン光周波数標準器は、電場で捕捉されたイオンの光周波数領域の量子遷移を利用して、高精度な周波数の基準を実現します。本グループでは、インジウムイオン (In<sup>+</sup>) を用いた光周波数標準器の実現を目指し、その狭線幅遷移 (時計遷移) の周波数計測に取り組んでいます。



インジウムイオンを捕捉するトラップ電極

イオンの捕捉にはイオントラップと呼ばれる技術が用いられ、単一原子のゼロ電場の位置での捕捉が可能であり、イオンの運動や他のイオンとの衝突等の影響を避けた、理想的な状態で周波数計測を行うことができます。また、一般的に同じ光周波数標準器である中性原子の[光格子型周波数標準器](#)と比較しても装置が小さく、小型・可搬型の装置開発が期待されています。

本グループが研究しているIn<sup>+</sup>はアルカリ土類型の電子配置を持っていて、イオントラップ電極より生じる電場の影響だけでなく隣り合ったほかのイオンの電場の影響にも鈍感です。また紫外光遷移を利用した汎用的な手法で量子状態の検出が可能であり、アルミニウムイオンなどの他のアルカリ土類型イオンよりもシステムが簡易となります。これらの特徴からIn<sup>+</sup>光時計は、より高精度な周波数計測が可能になると共に、イオン時計の周波数計測時間短縮を可能にする次世代の周波数標準である「複数個イオン光周波数標準」の有力な候補となります。本グループでは隣り合ったイオンの電場に対して鈍感であるというインジウムの性質を利用し、インジウムイオンの効率的な冷却のために同じトラップ中にカルシウムイオン (Ca<sup>+</sup>) を入れて共同冷却する手法を採っています。



異なる配置でトラップされたCa<sup>+</sup>イオンとIn<sup>+</sup>イオン

2017年には単一In<sup>+</sup>イオン光時計の時計遷移周波数計測を実現し、国際度量衡委員会(CIPM)の推奨値の改訂に貢献しました。また、2020年にはIn<sup>+</sup>イオン光時計とSr光格子時計との周波数比計測も行いました。このような光時計同士の直接比較測定では、現在の周波数標準であるCs原子時計の不確かさの限界を超えた計測が可能であるという利点があります。

## 参考文献

- 1) N. Ohtsubo, Y. Li, N. Nemitz, H. Hachisu, K. Matsubara, T. Ido, K. Hayasaka, **Frequency ratio of an <sup>115</sup>In<sup>+</sup> ion clock and a <sup>87</sup>Sr optical lattice clock**, [Opt. Lett. 45, 5950](#) (2020)
- 2) N. Ohtsubo, Y. Li, N. Nemitz, H. Hachisu, K. Matsubara, T. Ido, K. Hayasaka, **Optical clock based on a sympathetically-cooled indium ion**, [Hyperfine Interact. 240, 39](#) (2019)
- 3) N. Ohtsubo, Y. Li, K. Matsubara, T. Ido, K. Hayasaka, **Frequency measurement of the clock transition of an indium ion sympathetically-cooled in a linear trap**, [Opt. Express 25, 11725](#) (2017)
- 4) K. Wakui, K. Hayasaka, T. Ido, **Generation of vacuum ultraviolet radiation by intracavity high-harmonic generation toward state detection of single trapped ions**, [Appl. Phys. B 117, 957](#) (2014)
- 5) K. Hayasaka, **Synthesis of two-species ion chains for a new optical frequency standard with an indium ion**, [Appl. Phys. B 107, 965](#) (2012)

## 未踏研究プロジェクト

- In<sup>+</sup>イオン光周波数標準の研究開発
- テラヘルツ周波数標準
- 測地学と重力測定
- VLBI 技術開発

- ### NICTについて
- 理事長挨拶
  - 役員紹介
  - 組織
  - 研究所長紹介
  - NICT憲章
  - 目標・計画
  - 事業報告書
  - 評価
  - 公開情報
  - 所在地案内
  - 沿革
  - NICTフェロー紹介
  - アドバイザリーコミッティー
  - NICT PRムービー 『Nのいる未来』
- ### 研究成果
- 研究データ
  - 知財一覧
  - 論文一覧
  - 受賞一覧
  - NICTシリーズ集
  - 技術活用一覧
  - 標準化活動一覧
  - 出版・書物一覧
  - サービス・アプリ一覧

- ### 研究紹介
- 電磁波研究所
    - 電磁波伝搬研究センター
    - 電磁波標準研究センター
    - 電磁波先進研究センター
  - ネットワーク研究所
    - フォトニックICT研究センター
    - ワイヤレスネットワーク研究センター
    - レジリエントICT研究センター
  - サイバーセキュリティ研究所
    - サイバーセキュリティネクサス
    - ナショナルサイバートレーニングセンター
    - ナショナルサイバーオペレーションセンター
  - ユニバーサルコミュニケーション研究所
    - 先進的音声翻訳研究開発推進センター
    - データ駆動知能システム研究センター
    - 統合ビッグデータ研究センター
  - 未来ICT研究所
    - 神戸フロンティア研究センター
    - 小金井フロンティア研究センター
    - 脳情報通信融合研究センター
  - Beyond 5G研究開発推進ユニット
    - テラヘルツ研究センター
  - 量子ICT協創センター

- ### オープンイノベーション推進本部
- 設備・データを使いたい
    - 総合テストベッド
    - AIデータテストベッド
    - 研究データ
    - B5G共用研究施設利用 (委託研究)
    - 研究施設等の外部利用
  - 連携・相談したい
    - 共同研究をしたい
    - 委託研究を受けたい
    - 研究を委託したい
    - 国際連携したい
    - 相談したい (技術相談)
    - 外部連携の事例
  - 研究成果を使いたい
    - NICTシリーズ集
    - ニューノーマル時代に資する技術シリーズ
    - 研究成果/知財/標準化
  - 支援を受けたい
    - スタートアップ支援
    - 情報バリアフリー
    - 各種支援制度
  - Beyond 5G研究開発促進事業
    - Beyond 5G研究開発促進事業 (ポータル)
    - Beyond 5G研究開発促進事業 (委託研究)
    - B5G共用研究施設利用 (委託研究)
- ### イノベーションデザインイニシアティブ (IDI)
- ホワイトペーパー
  - 活動報告書

- ### 採用
- 研究職・研究技術職採用
  - 総合職・有期一般職採用
  - インターンシップ
  - 障がい者採用
- ### 広報
- 新着情報
  - プレスリリース
  - お知らせ
  - イベント
  - オープンハウス一覧
  - 出版物・発行書籍
  - パンフレット
  - Youtube動画
  - Twitter
  - Facebook
  - Instagram
  - 展示室のご案内
  - バーチャル展示室のご案内
  - 本部展示室見学ツアーのご案内
  - ホワイトペーパー
  - NICT先端研究
  - NICT PRムービー 『Nのいる未来』
- ### 公募・調達
- 公募情報
  - 調達