



令和6年度 経済安全保障上の 戦略的重要技術の獲得等に 係る調査研究

調査研究報告書

令和7 (2025) 年3月

Agenda

- 1) 本事業のゴール / 調査方針
- 2) 各調査項目概要
 - 2-1) 超電導MRI
 - 2-2) RFモジュール
 - 2-3) 中性原子方式量子コンピュータ
 - 2-4) 量子ジャイロスコープ
 - 2-5) 6G基地局

技術/産業上のプレゼンスの調査を通じ経済安全保障上の重要性の高い技術等を同定し、研究開発支援や諸外国との連携等、政策上の示唆を得ることが本件の究極的なゴール

事業実施の基本方針：背景・経緯及び本事業のゴール



背景・経緯

[背景]

- 不安定化する世界情勢の中で、各国において「**経済安全保障**」が注目されており、各種施策に活用しようとする動きが広がっている
- このような動きの中、「**経済**」、「**防衛**」、「**国民の生命/身体**」にとって重要な品目のサプライチェーン/バリューチェーンにおける「**チョークポイント**」¹をどのように保有するかについて、**我が国単独**で有する場合、**我が国及びその友好国等**に分散して有する場合、**経済安全保障上の懸念国**が有する場合のそれぞれが想定され、**必要な対応は相違**
- また、コンピューティング/クリーンテック/バイオテック等の分野で、「**破壊的技術革新**」が経済社会の構造を大きく変えており、我が国も、この動向を捉え、**技術的優位性を創出することが不可欠**

[経緯]

- 令和4年5月に**経済安全保障推進法**が成立し、我が国として、**技術等に関する優位性・不可欠性の確保等**に向け諸施策を講じているところ
- また、経済産業省としても、「**経済安全保障に関する産業・技術基盤強化 アクションプラン改訂版**」を取りまとめ、対象技術や施策について、検討を行っているところ
- このような中、内閣府として、「**経済**」、「**防衛**」、「**国民の生命/身体**」にとって重要な品目や破壊的技術革新が進む分野を対象に、「**戦略的重要技術**」（我が国等が技術的優位性等を示して不可欠性や自律性を維持・獲得する蓋然性の高い具体の技術・製品）を特定し、経済安全保障上、必要な施策を企画・推進していく必要がある（上記「アクションプラン」では「**技術インテリジェンス**」に対応）

1. 高い技術力や市場シェア等を有することにより、他部分に対し極めて強い影響力を持ち得るサプライチェーンの構成要素



本事業のゴール

経済安全保障上、特に重要性が高い領域（破壊的技術革新を伴うものを含む）について、

- サプライチェーン/バリューチェーンの構造を明らかにした上で、どの技術/製品が重要分野を支え、「**チョークポイント**」となっているかが明らかになっている
- 技術/製品や「**チョークポイント**」それぞれを、誰が有しているかが明らかになっている（我が国が技術的優位性を有する「**戦略的重要技術**」を含む）

これらのそれぞれについて、同志国との連携含め、**採るべき施策が具体化されている**

経済安保上の重要物資・技術は、「① 破壊的技術革新が進む領域」と、「② 我が国が技術的優位性を持つ領域」、「③ 対外依存の領域」に分類、これを踏まえることが重要

経済安全保障上重要な物資・技術の特定と政策アプローチ

経済安全保障上重要な物資・技術の特定と政策アプローチ

- コンピューティング、クリーンテック、バイオテック、防衛等の分野は、将来にわたる我が国の経済安全保障上の産業・技術基盤として不可欠。それぞれの分野で特に**重要なサプライチェーンに注目し、その維持・発展に政策資源を集中的に投入**する。
- 経済安全保障上重要なサプライチェーンにおいて鍵を握る**物資・技術を特定したうえで、技術革新の動向、我が国における相対的な優位性、対外依存度を分析・把握し、強靱化に向けた適切な政策手段を当てはめていく。**
- **経済安全保障上重要な物資を改めて洗い出した上で、リスク・脅威に対応した適切な政策手段を整理し、経済安保法の「取組方針」に反映させる。**

<経済安全保障の観点から重視すべき物資・技術の整理>

	将来の不可欠性・自律性の獲得	不可欠性の維持	自律性の回復
	① 破壊的技術革新が進む領域 次世代コンピューティング (例：量子コンピュータ・先端半導体) 次世代クリーンテック (例：ペロブスカイト・全固体電池) バイオものづくり (例：合成生物学・バイオファウンドリ) 3分野以外 (防衛・宇宙・基盤技術) 防衛・宇宙分野の先進技術	② 我が国が技術優位性を持つ領域 製造装置・部素材・機器等 (例：MLCC・光ファイバー・複合機) 高性能パワー半導体・マイコン等 製造装置・部素材等 検査・分析装置等 航空機部素材等 (炭素繊維・エンジン用素材)	③ 対外依存の領域 <small>(技術以外の要素が差別化要因となり、対外依存を起こす領域)</small> 一般的なレガシー半導体等 重要鉱物等 抗菌性物質製剤等 航空機部素材等 (大型鍛造・鋳造)
各領域に対する取組の方向性	技術優位性の創出	機微技術の流出・拡散防止	過剰依存構造の防止・是正
	※ 点線枠内の物資・技術は例示		

17

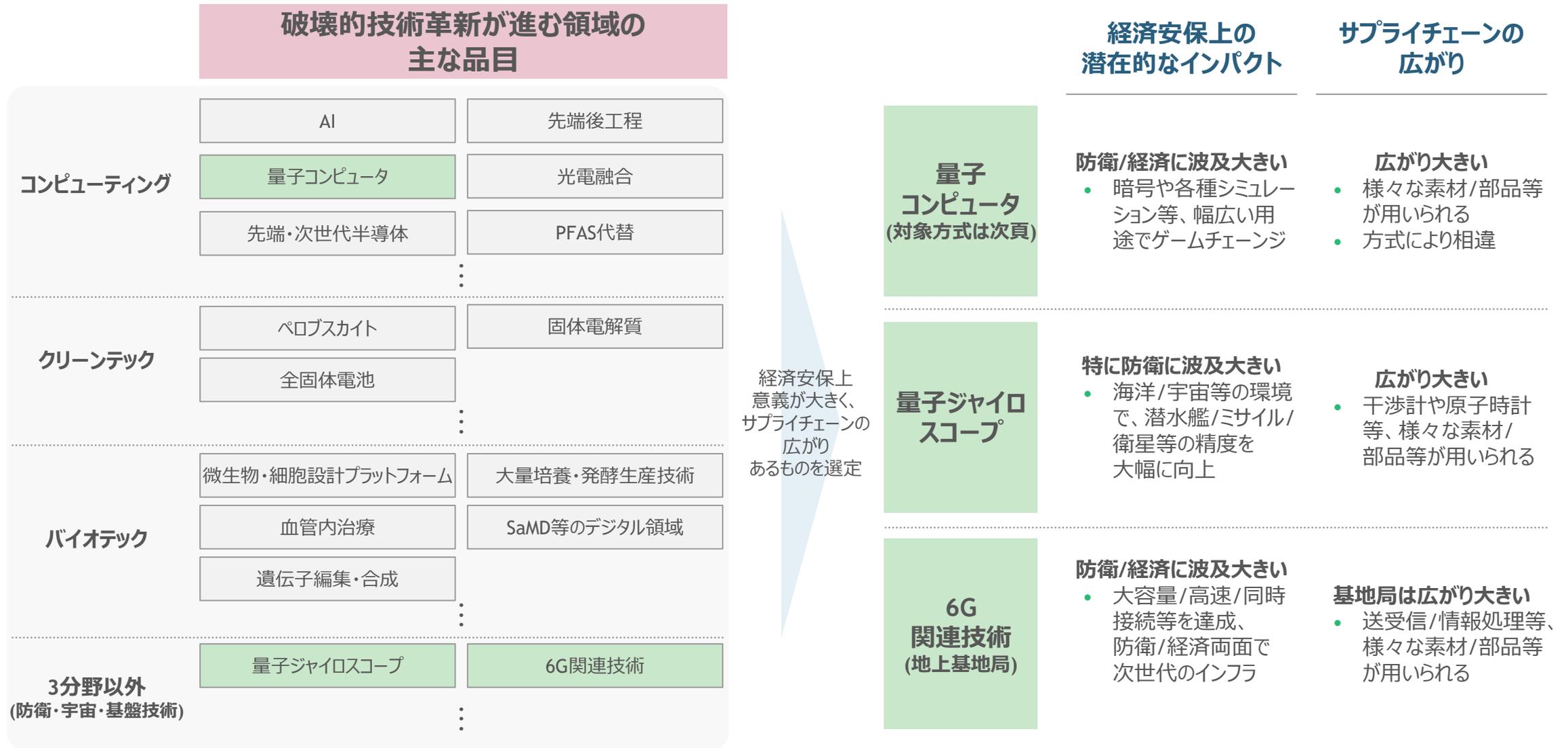
本事業においては、「① 破壊的技術革新領域」、「② 技術優位性を持つ領域」のそれぞれで、経済安全保障上のインパクトの大きい品目を選定する必要あり

経済安全保障上重要な物資・技術の特定と政策アプローチ

産業・技術基盤強化に向けた取組の方向性

- サプライチェーン分析や技術分析を通じて、経済安全保障上重要な産業・技術基盤上で鍵を握る物資・技術を特定。
- 技術優位性を「守る」ばかりでなく、我が国が他国に比して技術力でリードできるよう、民間の取組を積極的に支援していくことが何よりも重要。
さらに、同志国との連携や産業界との戦略的対話も引き続き継続する。
- 端的には、
 - ① 破壊的技術革新が進む領域では、国内における技術革新に向けた民間投資を強力に支援するとともに、国際共同投資を含めて戦略的な国際協力を行う。
 - ② 我が国が技術優位性を持つ領域では、機微技術の流出防止に向けて官民での技術管理を推進するとともに、同志国と協調した技術優位性の維持・強化策を講じる。
 - ③ 市場や技術において対外依存が顕著な領域では、同志国に加えてグローバルサウス諸国を巻き込みつつ、サプライチェーンの多角化に加え、持続可能性等の原則に基づく需要創出・供給力強化の好循環に向けた政策協調を実現していく。
- これまでに講じられてきた施策をマッピングし、足元の経済安全保障を取り巻く情勢を踏まえ更なる対策が必要な場合には、躊躇なく施策を講じていく。

「破壊的」領域からは、経済安保上の意義とサプライチェーンの広がりに着目して選定



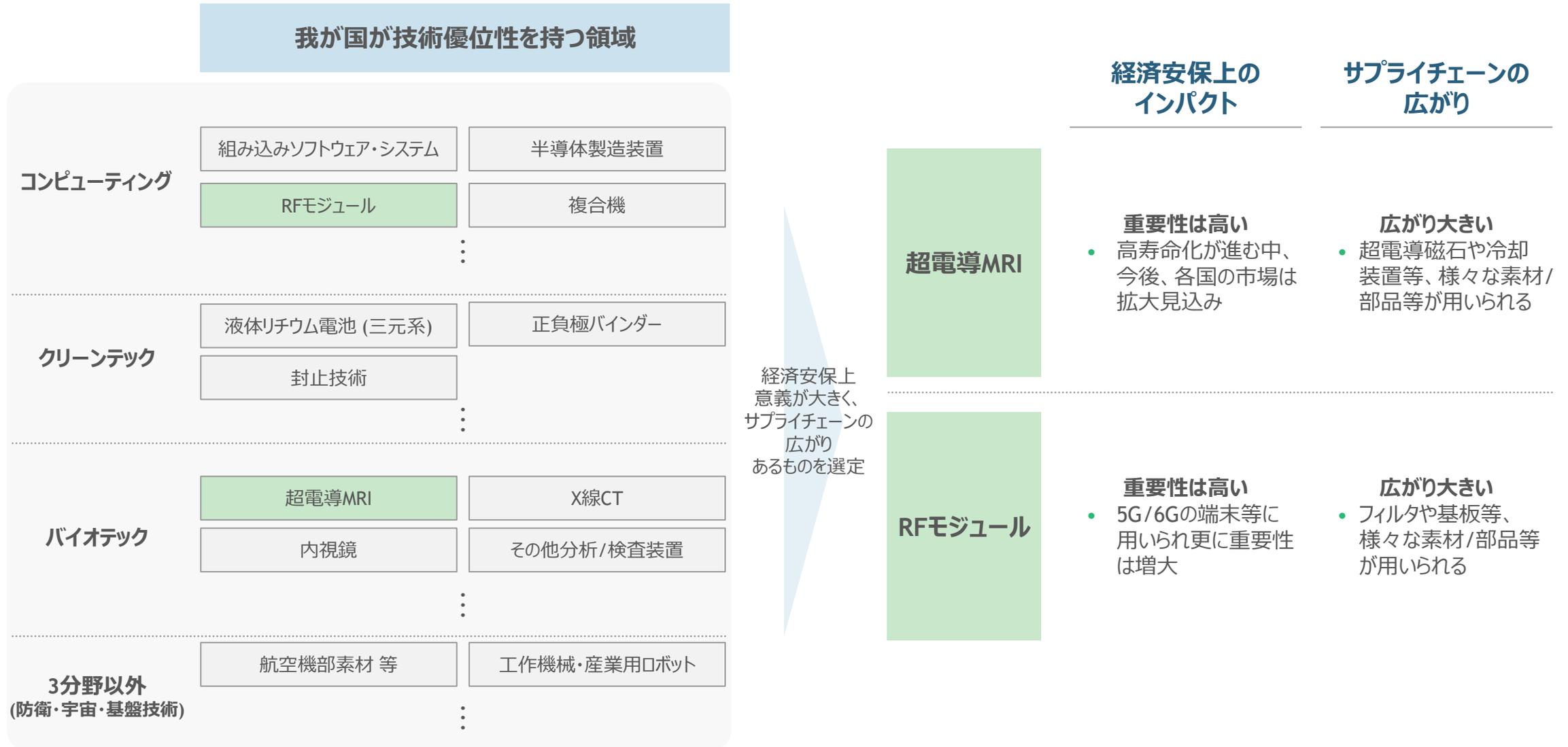
経済安保上
意義が大きく、
サプライチェーンの
広がり
あるものを選定

将来的な主流化の可能性が高いと見込まれている方式の一つである中性原子方式を調査

量子コンピュータにおけるハードウェア方式間の比較

		超伝導方式	イオントラップ方式	中性原子方式	半導体方式	光方式	
概要	仕組み	超伝導回路のジョセフソン接合で量子ビットを形成しマイクロ波で操作	電磁場でイオンをトラップし、レーザーで量子を操作	光トラップとレーザー冷却を用いて中性原子を操作	電圧をかけて量子ドットの位置・磁場を制御して量子状態を操作	光子を量子ビットとして利用し、光学素子で操作	
	実用化ステータス	実機運用開始済	実機運用開始済	国内では2030年度の実用化を目指す	実用化は2030年代後半以降	実用化は2030年代後半以降	
完成品の要件	A 将来的な主流化	大規模化	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> • 実用に必要な数の量子ビットを集積するとQPUが会議室程度の大きさになる可能性 	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> • イオンが電荷を持つため、量子ビット間に電気的な相互作用がある 	原理的に大規模化可能 <ul style="list-style-type: none"> • 基本的にレーザー光のみで配列を操作するため多数の量子ビットの配列も比較的容易 	原理的に大規模化可能 <ul style="list-style-type: none"> • 量子ビットである電子のサイズが小さい • これまでの半導体製造技術を活用可能 	原理的に大規模化可能 <ul style="list-style-type: none"> • 導波路の製造にシリコンフォトニクス技術を活用しやすい
		エラー訂正	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> • 量子ビット間の距離が近く、相互作用が強い • エラー訂正の複合器は室温で使用される 	難易度は相対的に高くない <ul style="list-style-type: none"> • エラー訂正に使用する論理量子ビットの構築が比較的容易 	難易度は相対的に高くない <ul style="list-style-type: none"> • コヒーレンスも長く、量子の状態が均一なためエラーが起きにくい 	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> • 量子ビットの制御に時間を要するため精密な計算が難しい 	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> • 光パルスが光路を伝播する間にロスが生じ、エラーが多く発生しやすい
		設置の容易さ	機器のサイズが大きい <ul style="list-style-type: none"> • QPUの大きさに加えて冷却器が必要 	大きな問題はない	大きな問題はない	機器のサイズが大きい <ul style="list-style-type: none"> • QPUの大きさに加えて冷却器が必要 	大きな問題はない
	B 主な部品・技術	<ul style="list-style-type: none"> • 希釈冷凍機 • マイクロ波制御装置 • 量子アルゴリズム • 誤り訂正符号 	<ul style="list-style-type: none"> • 光学レーザー • 検出用カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> • 光ピンセット • 検出用カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> • 希釈冷凍機 • マイクロ波制御装置 	<ul style="list-style-type: none"> • 量子光源 • 導波路 	

従来技術も、経済安保上の重要性があり、サプライチェーンの広がりある品目を選定



以上より、「破壊的」領域と「従来技術」領域双方のバランスあるかたちでターゲットを選定

調査対象分野/調査対象とするターゲット品のまとめ

対象分野	対象テーマ	技術の区分
コンピューティング/クリーンテック/バイオテック/ 防衛宇宙・基盤技術の区分に留意	経済安保上の重要性、サプライチェーンの 見立て、既存調査とのカバー関係に留意	「破壊的技術革新」と「従来技術」のバランス に留意
 バイオ/医療	① 超電導MRI	従来技術
 基盤技術	② RFモジュール	従来技術
 量子コンピュータ	③ 「ゲート型」×「中性原子方式」	破壊的技術革新
 防衛宇宙	④ 「量子」×「ジャイロスコープ」	破壊的技術革新
 通信機器	⑤ 「6G」×「基地局」(地上)	破壊的技術革新

バリューチェーン/サプライチェーンを俯瞰してチョークポイントを特定、 これらを深堀の上、政策を検討

調査/分析のアプローチ



- 各品目のバリューチェーン/サプライチェーンは、どのような品目で構成され、どのような技術的課題があるか



- 構成品目のうち、技術的難易度や市場シェアの観点で深掘りすべきもの(戦略的重要技術)はどれか



- 各深掘品目の市場シェアや主なプレイヤーの競争優位性、技術的課題はどうなっているか



- 品目全体やこれを構成する各戦略的重要技術に対し、日本政府としてどのような対応を行うべきか

(参考) 各品目について、我が国の競争優位性や経済安全保障上の重要度に応じ、Own/Collaborate/Accessのいずれかのスタンスを採ることが考えられる

施策オプションの一例

対象となる品目	>	政策の方向性
自国の競争優位性が高い品目	1 Own	新技術の発見から大規模製造、商業化に至るまで、新たな開発について、 リーダーシップとオーナーシップを保有する <ul style="list-style-type: none">常に、CollaborateとAccessの要素は常に組み合わせる
自国の独自貢献ができ、同志国が競争優位性を持つ品目	2 Collaborate	自国の目標を達成するために、 他国との協力を可能とする自国独自の貢献を提供する
経済安保上重要だが、特定国が競争優位性を持つ品目	3 Access	様々な選択肢や取引、他国との関係等を通じて、 いずれかの国から、重要な科学技術の獲得を志向する

Agenda

- 1) 本事業のゴール / 調査方針
- 2) 各調査項目概要
 - 2-1) 超電導MRI
 - 2-2) RFモジュール
 - 2-3) 中性原子方式量子コンピュータ
 - 2-4) 量子ジャイロスコープ
 - 2-5) 6G基地局

Agenda

1) 本事業のゴール / 調査方針

2) 各調査項目概要



2-1) 超電導MRI

2-2) RFモジュール

2-3) 中性原子方式量子コンピュータ

2-4) 量子ジャイロスコープ

2-5) 6G基地局



超電導MRI装置全体では、高画質化/ヘリウム削減/利便性向上への技術革新が進む

概要・技術的課題

概要

- 磁石による強い磁場¹と、コイルの電波によって人体の断層画像を撮影する装置
- X線被ばくをせずに高画質の画像を撮像でき、がんや脳疾患などの精密診断に用いられる
- 静磁場強度²が高いほど解像度が上がり、市場は1.5T (テスラ) と3Tが主流。アカデミック領域で7Tの研究開発がなされている
 - 1.5Tと3Tのシェアは、現状は6:4
 - 今後先進国を中心により**高画質化が可能な3T**が主流になると見込まれる

技術的課題

高画質化

- 7T以上の高磁場磁石を利用した装置の開発、利用
- AIを活用した撮影ノイズ削減

資源の調達途絶リスクに対応した脱ヘリウム技術

- ヘリウムの利用量の削減、充填不要の密閉設計
 - ヘリウム量を従来の1,500リットルから、7~8リットルまで削減
- ヘリウムを使用しない脱ヘリウム設計
 - 超電導磁石とコールドヘッドの設計工夫により、ヘリウムを利用せずに超電導特性を発揮できる冷却技術の実現

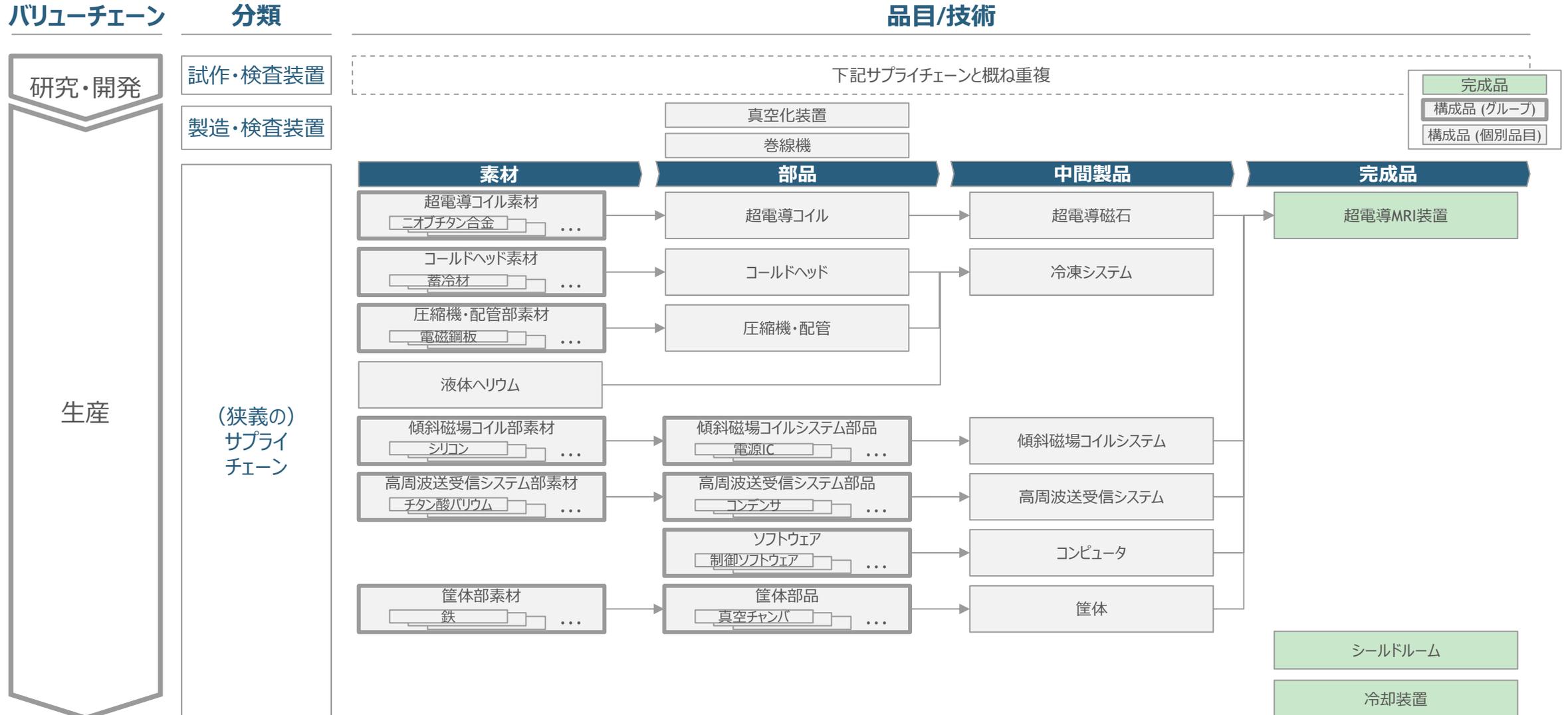
医療従事者、患者の利便性向上

- 圧縮センシング等の高速撮影技術による撮像時間の短縮
- AIを活用した診察サポート
 - AIアプリによる撮影時の設定に係る時間の短縮
 - 陰影などの診断補助
- 患者の快適さ向上
 - 患者に触れるRF受信コイル用の新素材の開発
 - 閉所恐怖症対策の画像設備

1. 磁石の磁力が及ぶ空間; 2. 磁石の強度。単位はT(テスラ)で表す
Source: MRIメーカー各社HP; エキスパートインタビューに基づくBCG分析



超電導MRIのバリューチェーン/サプライチェーン (全体像)



Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



超電導MRI 全体サマリ [1/3] : 重要品目 (完成品/主要構成品)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
超電導装置	A社、B社、C社、D社、E社	=> 大学等と最新研究で協力し、技術力を向上していく必要
超電導磁石、超電導コイル	A社、B社、C社、D社、E社	=> 大学等と最新研究で協力し、技術力を向上していく必要
冷凍システム、コールドヘッド	A社 等	=> 冷凍能力等の技術を適切に管理する必要
傾斜磁場コイルシステム、 傾斜磁場コイル	A社、B社、C社、D社、E社	=> 磁場形成等の技術を適切に管理する必要



超電導MRI 全体サマリ [2/3] : 重要品目 (超電導MRI装置で特に重要になるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
低温超電導線	A社、B社、C社、 D社、E社、F社	=> 製造プロセスに係る技術を適切に管理する必要
電源IC	A社 等	=> 要求性能を満たす回路設計等の技術を適切に管理する必要
ソフトウェア	A社、B社、C社、D社、E社 ※ 他各国スタートアップ企業	=> 大学等と最新研究で協力し、技術力を向上していく必要



超電導MRI 全体サマリ [3/3] : 重要品目 (超電導MRI装置以外にも広く使われるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
ニオブ	A社、B社、C社	=> 輸入/流通を確保していく必要
電磁鋼板	A社、B社、C社	=> 製造プロセスに係る技術を適切に管理する必要
液体ヘリウム	A社、B社、C社、D社	=> 輸入/流通を確保していく必要
チタン酸バリウム	A社、B社、C社、D社 (その他MLCCメーカーの内製)	=> デバイスに合わせた独自の配合等の技術を適切に管理する必要

Agenda

1) 本事業のゴール / 調査方針

2) 各調査項目概要

2-1) 超電導MRI

➤ 2-2) RFモジュール

2-3) 中性原子方式量子コンピュータ

2-4) 量子ジャイロスコープ

2-5) 6G基地局



RFモジュールは5G対応に向けて技術進化が進んでいる

概要

RF (Radio Frequency, 無線周波数) モジュールは、無線通信接続を可能とするための電子デバイスで、検出、変調、増幅の3つの機能を持つ

- 検出：アンテナが受信した電磁波信号から必要な信号を抽出
- 変調：電磁波信号を端末が処理可能な電気信号へ変換
- 増幅：信号を通信可能な大きさに増幅

電波を受信し、電気信号に変える受信側部品と、信号を電波に変えアンテナから送信する送信側部品で構成される

スマートフォンの通信向けのほか、用途によって複数の種類に分かれる

- 車載向け
- 無線LAN向け
- Bluetooth向け
- ウルトラワイドバンド(UWB)¹向け

5G対応によって、対応周波数帯の増加や情報処理高速化等の高度化と、小型化、消費電力の抑制等を両立する技術開発が求められる

- 5G向けは、1GHz以下から30GHz以上のミリ波まで広い周波数帯への対応が求められる
- 通信端末の高機能化に伴い搭載するRFモジュール数も増えており、サイズ小型化ニーズが高まっている

技術的課題

高性能・小型化を両立した高密度設計

- 回路を密集させると高熱になり性能が低下しやすい
- 密集した部品配置でも部品間のノイズ干渉を防ぐには部品・回路設計が重要

5G通信対応に向けた高い周波数への対応

- 高い周波数は電波が遠くまで届かず、送受信難易度が高い

情報処理の高速化

- 高速通信を阻害しない高速信号処理が可能な回路設計

電力効率の向上

- スマートフォン向けはバッテリー寿命の確保のため特に省電力化のニーズが高い

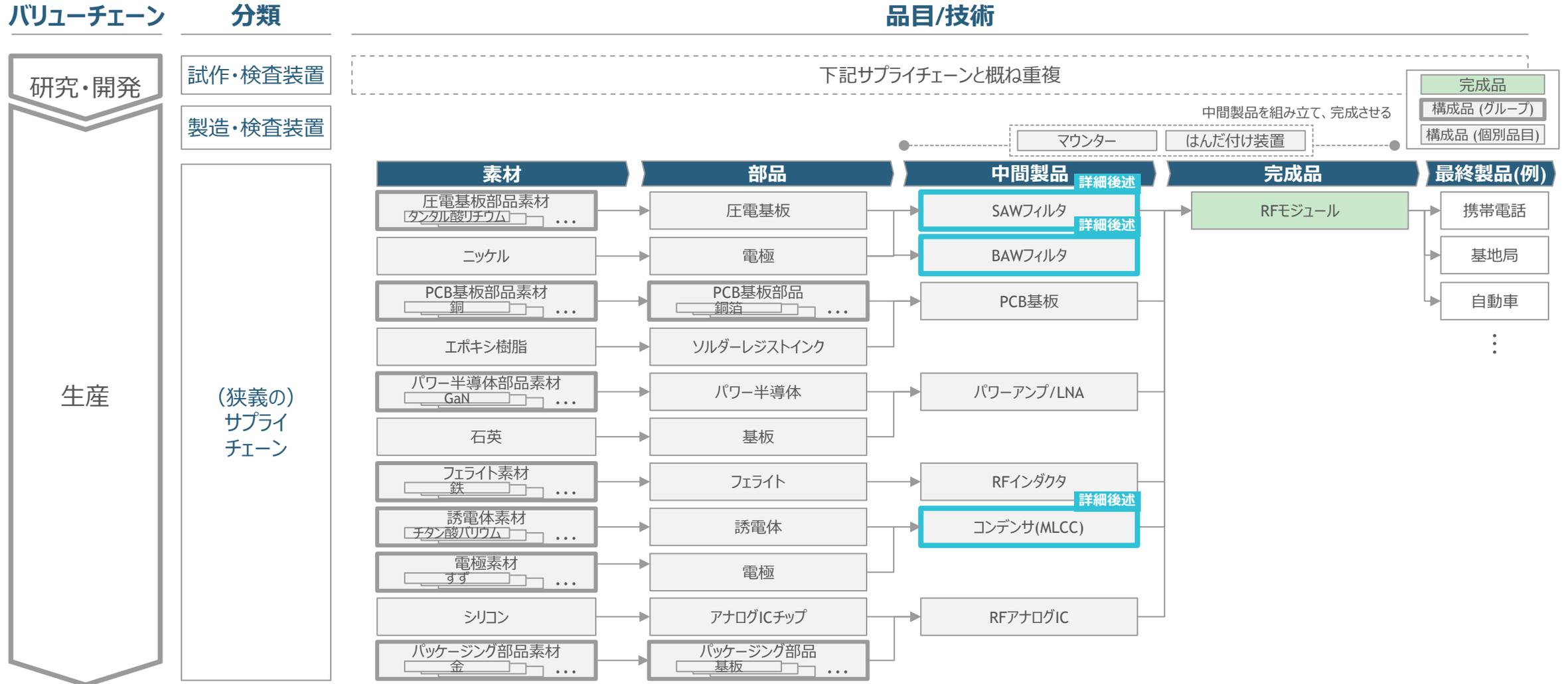
コスト抑制

- 高機能素材、部品を利用しつつ効率化によって製造コストを抑制
- 一般消費者向け製品のため、値上げ難易度が高い

1. 超広帯域無線。短距離でのデータ通信を行う技術で、位置検出精度が高いことから紛失防止を目的としたスマートフォンへの搭載や、車のスマートキーへの搭載等の事例が見られる
Source:各社HP; エキスパートインタビューに基づくBCG分析



RFモジュールのバリューチェーン/サプライチェーン (全体像)





(参考) SAWフィルタとBAWフィルタの概要

SAWフィルタ

主な用途

- 100MHz~3GHzの周波数帯を中心とした信号のノイズ除去に使用
 - SAWフィルタの製造コストが低いため、3GHz以下ではBAWフィルタによる置換は発生しないと考えられる
- 日本・同志国メーカーが開発している先端SAWフィルタは3~6GHz程度の周波数帯にも対応

動作原理

- 高周波電圧が加わると入力用電極が励振し、電極のピッチに対応した表面弾性波を生じる
- 表面弾性波が基板を伝播し、出力用電極に到達する
- 出力用電極で弾性波が再び電気信号に変換される

BAWフィルタ

- 3GHz以上の周波数帯を中心とした信号のノイズ除去に使用
- 特に、5G以降の通信規格で活用されるセンチ波・ミリ波に対してはBAWフィルタが活用されるため、今後の需要拡大が見込まれている

- 高周波電圧が加わると入力用電極が励振し、電極のピッチに対応したバルク弾性波を生じる
- 表面弾性波が基板を伝播し、出力用電極に到達する
 - SAWフィルタでは水平方向に弾性波が伝播するが、BAWフィルタでは垂直方向に伝播する
- 出力用電極で弾性波が再び電気信号に変換される



(参考) MLCCの概要

概要

MLCC¹は電圧の安定化や信号ノイズの除去の機能を持っており、スマホ等モバイル機器、EV、家電製品等幅広い電子機器で使用される

RF用途では、コンデンサは主に低周波数帯の信号ノイズ除去に用いられる

- 低周波数帯ではインピーダンス²が高く、高周波数帯ではインピーダンスが低いという特徴を用いて、低周波数帯のノイズ除去に用いられる
- 高周波数帯のノイズ除去には、RFインダクタが用いられる

コンデンサの中でも、特にスマホ向けをはじめRF用途では小型化が重視されるため、他の種類のコンデンサはRF用途ではほとんど用いられない

MLCCは、チタン酸バリウム等の誘電体をシート状に形成して電極を印刷したものを層状に積み重ねたものを焼成し、セラミック化することで製造される

技術的課題

小型化・高容量化の両立

- 周波数帯の拡大でRFモジュールの員数が増加するため、RFモジュール及びその中のデバイスも小型化が必要
- 一方で、デバイスを小型化した場合には電気容量が低下する傾向
- そのため、必要な電気容量を確保した上での小型化が必要

高周波対応に向けた材料・プロセス開発

- 5G/6Gの普及によって、RFモジュール用のMLCCにも高周波特性が求められる
- 主材料である誘電体 (チタン酸バリウム等) に加え、高周波特性が出やすい材料の選定及び配合比率の調整が必要
- また、高周波特性の向上にはセラミックの焼成条件の調整も行う

1. Multi - Layer Ceramic Capacitor; 2. 交流回路における電流の流れにくさを示す値
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



RFモジュール 全体の重要技術サマリ [1/4] : 重要品目 (RFモジュールで特に重要となるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
SAWフィルタ ¹	(先端品) A社、B社	(従来品) <ul style="list-style-type: none"> コモディティ化が進んでいるため、技術的な難易度は低い (先端品) => 薄膜製造等の技術を適切に管理する必要
BAWフィルタ ²	A社、B社、C社、 D社、E社、F社	=> 要求を満たす高い設計/生産等の技術を適切に管理する必要
PCB基板 ³ (ハイエンド品)	A社、B社、C社、 D社、E社、F社	=> 特に積層に関する技術を適切に管理する必要

1. Surface Acoustic Wave。特定の周波数の電気信号を取り出すフィルタの一種; 2. Bulk Acoustic Wave。特定の周波数の電気信号を取り出すフィルタの一種; 3. Printed Circuit Board。様々な電子部品をボード上で電気的に接続する

Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



RFモジュール 全体の重要技術サマリ [2/4] : 重要品目 (RFモジュールで特に重要となるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
RFインダクタ ¹ 、インダクタ材料	A社、B社	=> 配合や条件設定に係る技術を適切に管理する必要
MLCC ² [デバイス本体]	A社、B社、C社、D社	=> 小型化/高容量化や、配合等の調整技術を適切に管理する必要
MLCC [製造装置]	A社、B社、C社、D社 E社、F社、G社、H社、I社	=> 焼結等の重要工程の技術を適切に管理する必要

1. 信号のノイズ除去を行う部品の一つ; 2. Multi -Layer Ceramic Capacitor。セラミックを用い、内部電極と誘電体層が多層に積層されたチップ部品タイプのコンデンサ。電圧の安定化や信号ノイズの除去を行う
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



RFモジュール 全体の重要技術サマリ [3/4] : 重要品目 (RFモジュールで特に重要となるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
RFアナログIC	A社、B社、C社、D社、E社	=> 設計等の技術を適切に管理する必要
銅箔	A社、B社、C社、D社	=> 配合/加工等の技術を適切に管理する必要
ソルダーレジストインク ¹	A社、B社	=> 素材等の技術を適切に管理する必要

1. PCB基板の表面を覆い、銅配線やパッドの保護を目的とする絶縁材料
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



RFモジュール 全体の重要技術サマリ [4/4] : 重要品目 (RFモジュール以外にも広く使われるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
パワー半導体 (GaN/SiC)	A社、B社、C社、D社、E社	=> 素材/製造プロセス等の技術を適切に管理する必要
窒化アルミニウム	A社、B社	=> 小径/高純度品製造等に係る技術を適切に管理する必要
チタン酸バリウム	A社、B社、C社、D社 (その他MLCCメーカーも内製)	=> デバイスに合わせた独自の配合等の技術を適切に管理する必要

Agenda

1) 本事業のゴール / 調査方針

2) 各調査項目概要

2-1) 超電導MRI

2-2) RFモジュール

➤ 2-3) 中性原子方式量子コンピュータ

2-4) 量子ジャイロスコープ

2-5) 6G基地局



将来的な主流化の可能性が高いと見込まれている方式の一つである中性原子方式を調査

量子コンピュータにおけるハードウェア方式間の比較

		超伝導方式	イオントラップ方式	中性原子方式	半導体方式	光方式	
概要	仕組み	超伝導回路のジョセフソン接合で量子ビットを形成しマイクロ波で操作	電磁場でイオンをトラップし、レーザーで量子を操作	光トラップとレーザー冷却を用いて中性原子を操作	電圧をかけて量子ドットの位置・磁場を制御して量子状態を操作	光子を量子ビットとして利用し、光学素子で操作	
	実用化ステータス	実機運用開始済	実機運用開始済	国内では2030年度の実用化を目指す	実用化は2030年代後半以降	実用化は2030年代後半以降	
完成品の要件	A 将来的な主流化	大規模化	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> 実用に必要な数の量子ビットを集積するとQPUが会議室程度の大きさになる可能性 	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> イオンが電荷を持つため、量子ビット間に電気的な相互作用がある 	原理的に大規模化可能 <ul style="list-style-type: none"> 基本的にレーザー光のみで配列を操作するため多数の量子ビットの配列も比較的容易 	原理的に大規模化可能 <ul style="list-style-type: none"> 量子ビットである電子のサイズが小さい これまでの半導体製造技術を活用可能 	原理的に大規模化可能 <ul style="list-style-type: none"> 導波路の製造にシリコンフォトニクス技術を活用しやすい
		エラー訂正	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> 量子ビット間の距離が近く、相互作用が強い エラー訂正の複合器は室温で使用される 	難易度は相対的に高くない <ul style="list-style-type: none"> エラー訂正に使用する論理量子ビットの構築が比較的容易 	難易度は相対的に高くない <ul style="list-style-type: none"> コヒーレンスも長く、量子の状態が均一なためエラーが起きにくい 	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> 量子ビットの制御に時間を要するため精密な計算が難しい 	難易度が高い <ul style="list-style-type: none"> 光パルスが光路を伝播する間にロスが生じ、エラーが多く発生しやすい
		設置の容易さ	機器のサイズが大きい <ul style="list-style-type: none"> QPUの大きさに加えて冷却器が必要 	大きな問題はない	大きな問題はない	機器のサイズが大きい <ul style="list-style-type: none"> QPUの大きさに加えて冷却器が必要 	大きな問題はない
	B 主な部品・技術	<ul style="list-style-type: none"> 希釈冷凍機 マイクロ波制御装置 量子アルゴリズム 誤り訂正符号 	<ul style="list-style-type: none"> 光学レーザー 検出用カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> 光ピンセット 検出用カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> 希釈冷凍機 マイクロ波制御装置 	<ul style="list-style-type: none"> 量子光源 導波路 	



(参考) 量子コンピュータは、ユーザーから与えられた問題を「量子アルゴリズム」に沿って演算するもの

量子コンピュータを利用した演算の手順 (各ハードウェアで共通)

項目	詳細
演算内容の定義	問題の設定 <ul style="list-style-type: none"> 量子計算によって解きたい問題を設定する
	量子アルゴリズムの修正 <ul style="list-style-type: none"> 解きたい問題に合わせて量子アルゴリズムの初期化・ゲート操作に関する部分を修正する
量子計算	量子ビットのセッティング <ul style="list-style-type: none"> 量子ビットを演算前の状態にセットすべく、冷却/配列¹ <ul style="list-style-type: none"> レーザーによる量子冷却、光ピンセットによる量子の配列
	ビットの初期化 <ul style="list-style-type: none"> 光ピンセットによって各量子ビットを所定の位置に再配列 レーザー光線により各量子ビットを計算前の状態に設定する
	ゲート操作 <ul style="list-style-type: none"> レーザー光等を用いて量子状態の反転等のゲート操作を行う
	測定 <ul style="list-style-type: none"> ゲート操作終了後、別のレーザー光線照射等によって各量子ビットの状態の読み取り操作を行い、計算結果を測定する
ユーザーへの回答	演算の統計処理 <ul style="list-style-type: none"> 量子コンピュータが繰り返し行った計算を、FPGA²等を用いて確率的に処理し、尤もらしい回答を導き出す
	演算結果の返送 <ul style="list-style-type: none"> 統計処理を経て得られた計算結果をユーザーに返送する

- ユーザーまたはサービスのプロバイダが量子コンピュータの**外部**で実行

- 量子コンピュータ内で実行される**
 - 実行される手順は、すべて量子アルゴリズム内に定義
 - 量子計算におけるエラーには誤り訂正符号等を用いて対応する

ハードウェアにより方式が相違
(詳細次頁)

- 基本的にサービスのプロバイダが量子コンピュータの**外部**で実行
 - 統計処理からユーザー自身が行うケースもあり

1. 必ずしも計算1回毎に必要となるわけではない
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析

2. FPGA (Field Programmable Gate Array): 製造後に購入者やエンドシステムの設計者等がプログラムを変更できる半導体チップ



(参考) 量子操作は、ハードウェアの方式毎に原理や関連する重要部品が相違

中性原子/超電導方式の動作原理の比較

	中性原子方式	超電導方式
量子計算	量子ビットのセッティング	<ul style="list-style-type: none"> 希釈冷凍機によってミリケルビン以下の極低温に量子を冷却し、熱による励起を排除 <ul style="list-style-type: none"> 希釈冷凍機は、量子コンピュータの演算装置を極低温まで冷却する必要があり、技術難易度が高い
	ビットの初期化	<ul style="list-style-type: none"> 特定周波数のマイクロ波を照射し、量子状態を制御することでビットの初期化・ゲート操作を行う <ul style="list-style-type: none"> 量子操作の内容によって照射するマイクロ波を正確に制御する必要があるため、マイクロ波制御装置は技術的難易度が高い
	ゲート操作	
	測定	<ul style="list-style-type: none"> ゲート操作とは別種の近共鳴光を当てて各量子に蛍光を発させる それらの蛍光を検出用カメラで捕捉し、各量子ビットの状態を測定する



中性原子方式の量子コンピューターも、ビット数の増加と誤り訂正技術の構築が技術的課題として残る

概要・技術的課題

概要

冷却原子方式とも呼ばれ、レーザー光線によるドップラー効果によって**冷却・捕捉した原子を用いて量子計算**を行う

- 原子自体は約10マイクロケルビンまで冷却されるが、レーザー光線のみによって冷却するため超電導方式における希釈冷凍機のような**大規模な冷却装置は不要**

原子核と、その周囲の電子のスピンの向きによって**"0"、"1"を区別**することで量子計算を行う

量子同士の相互作用を容易に制御できるため、**より複雑な計算を実行**できるようになると考えられている

- 量子もつれ：複数の量子間において相互作用が発生させ、一方の量子が特定の状態となった場合にもう一方の量子の状態が定義
- 量子コンピュータでは、量子もつれを用いて計算を効率化・高速化

技術的課題

ビット数の増加

- より大規模な量子計算**を行うために、量子ビット数を増やし、演算能力を高める必要がある
 - 規模に依存するが、**数百~数万個程度**の場合が多い (QuEra社は2022年発表時点で**量子ビット 256程度**¹⁾)
- 将来的には、物理量子ビットの数に加え、**誤り訂正に用いられる論理量子ビット数**も考慮してビット数を増加させる必要がある

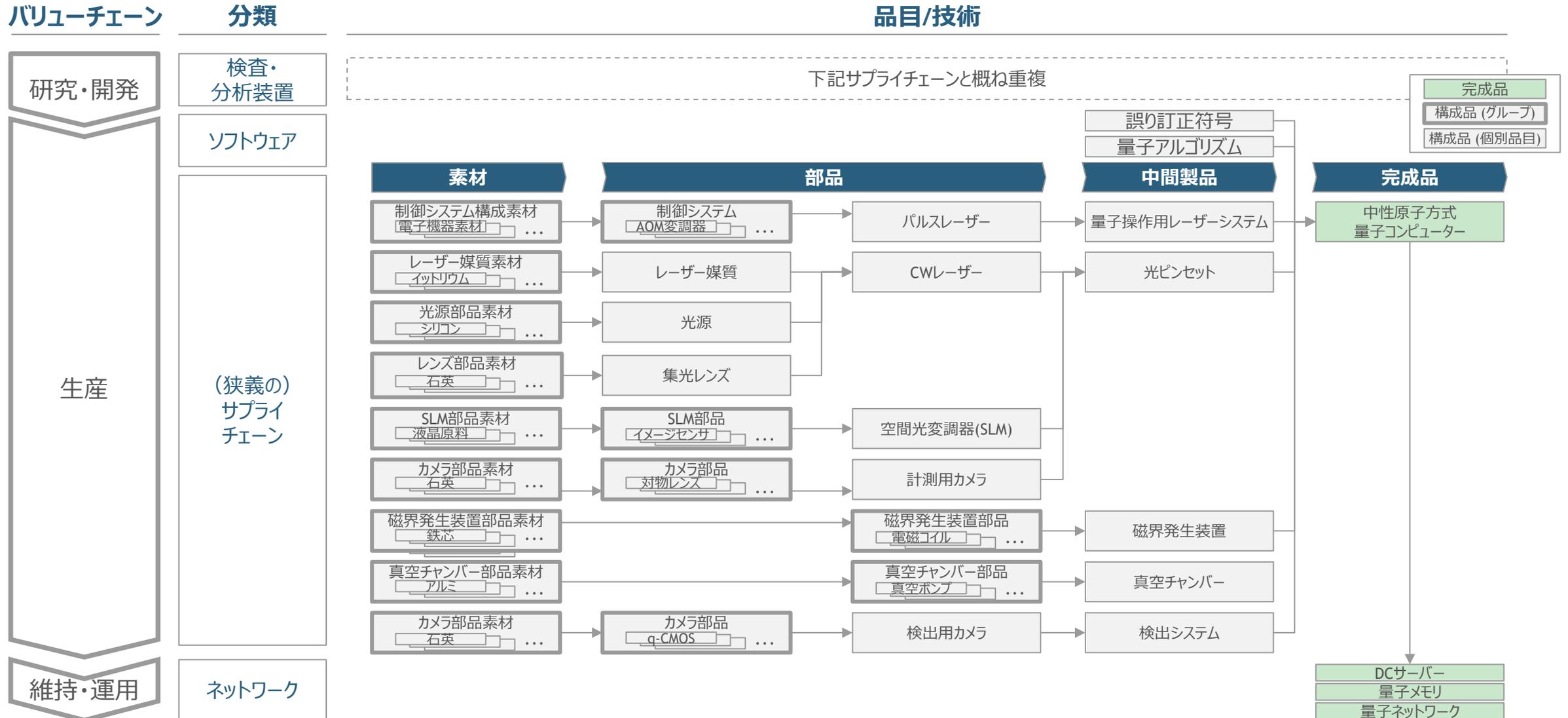
誤り訂正技術の構築

- 量子コンピュータは古典コンピュータよりも**周囲のノイズ (熱・音など) の影響を受けやすい**ため、計算中のエラーも発生しやすい
 - 現状の量子コンピュータでは、数百回に1回程度の頻度でエラーが発生する状態
 - 2023/4、QuEra社・ハーバード大による研究では、エラー率0.5%を達成

1. トラップする原子の数はこの数倍~程度となる。QuEra社の場合は、数千程度の原子をトラップしているとみられる
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子コンピュータ (中性原子方式) のバリューチェーン/サプライチェーン (全体像)



Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



中性原子方式量子コンピュータ 全体の重要技術サマリ [1/3] : 完成品/ソフトウェア

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
中性原子方式 量子コンピュータ	A社、B社、C社	=> ビット数増加等に向けた技術開発等を推進する必要
量子アルゴリズム ¹	A社、B社、C社、 D社、E社、F社、G社	=> SDK²の開発等を推進する必要
誤り訂正符号 ³	A社、B社、C社、D社	=> エラー発生確率の抑制等を推進する必要

1. 量子コンピュータのビットの初期化/ゲート操作/測定の手順を定義しているアルゴリズム; 2. Software Development Kit.; 3. 量子コンピュータの計算エラーに対応する技術
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



中性原子方式量子コンピュータ 全体の重要技術サマリ [2/3] : 重要品目 (中性原子方式量子コンピュータで特に重要となるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
量子操作用レーザーシステム、パルスレーザー ¹	A社、B社、C社	=> レーザー光の制御や小型化等を推進する必要
光ピンセット ²	A社、B社、C社、D社 E研究所	=> 照射の正確性/量子の移動速度向上等を図っていく必要
検出システム、 科学検出用カメラ	A社、B社、C社	=> ノイズ抑制等を推進する必要

1. 一定の繰り返し周波数で光を出力するレーザー; 2. 分子・量子をレーザー光線の中にトラップ(捕捉)し、特定の位置に量子を留める、または移動させる装置
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



中性原子方式量子コンピュータ 全体の重要技術サマリ [3/3] : 重要品目 (中性原子方式量子コンピュータ以外にも広く使われるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
イメージセンサ	A社、B社、C社、D社、E社	=> レンズ等の設計/加工等の技術を管理する必要
対物レンズ	<u>対物レンズ</u> A社、B社、C社、D社、E社、 F社、G社	=> コーティング等、加工技術等を管理する必要
光学ガラス	<u>光学ガラス</u> H社、I社、J社	

1. イメージセンサ内のフォトダイオードの上部に設置される、極小の集光レンズ
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析

Agenda

- 1) 本事業のゴール / 調査方針
- 2) 各調査項目概要
 - 2-1) 超電導MRI
 - 2-2) RFモジュール
 - 2-3) 中性原子方式量子コンピュータ
 - 2-4) 量子ジャイロスコープ
 - 2-5) 6G基地局



ジャイロスコープは用途・プレイヤーの観点から経済安全保障上の重要度が高い

力学量センサにおけるジャイロスコープの位置づけ

	モーションセンサ 動きを読み取るセンサ		変位センサ 位置を読み取るセンサ		力覚センサ 力の強さを読み取るセンサ
方式	ジャイロスコープ (角速度センサ) <ul style="list-style-type: none"> 量子式 光学式 	加速度センサ <ul style="list-style-type: none"> 光学式 静電容量式 	磁気センサ (角度センサ) <ul style="list-style-type: none"> TMR² GMR³ 	位置センサ <ul style="list-style-type: none"> GPS⁴ フォトセンサ 	圧力センサ <ul style="list-style-type: none"> ピエゾ式センサ 光ファイバ式センサ
概要	<ul style="list-style-type: none"> 姿勢制御に用いられる 電波や磁場などの外部環境の影響が少ない 軍事転用が可能な技術として各国で研究されている 	<ul style="list-style-type: none"> 加速度を検知することで衝撃や振動・移動などを検知可能 MEMS¹技術の進化により小型で高精度なデバイスの開発が進んでいる 小型で省電力であり、頑丈 	<ul style="list-style-type: none"> TMRなどの磁気センサは小型で高精度 磁力の影響などを受けやすい 	<ul style="list-style-type: none"> 物理的な位置変化を光学、抵抗、静電容量など様々な方法で検出 GPSなどの高精度なものは、装置が複雑化しやすい 方式によっては外部環境の影響を大きく受ける 	<ul style="list-style-type: none"> MEMS技術の進化により小型で高精度なデバイスの開発が進んでいる 小型で省電力であり、頑丈
用途	<ul style="list-style-type: none"> 潜水艦 ミサイル 人工衛星 	<ul style="list-style-type: none"> 車 産業用機械 	<ul style="list-style-type: none"> 車 産業用機械 	<ul style="list-style-type: none"> ナビゲーションシステム 産業用機械 	<ul style="list-style-type: none"> 産業用機械
スケーラビリティ	高精度の製品は大型で、技術的難易度も高く、大量生産は難しい	大量生産を行っている	大量生産を行っている	大量生産を行っている	大量生産を行っている
プレイヤー	高精度なものが求められる量子式・光学式は欧米の限られたメーカーが製造	グローバルに複数プレイヤーが存在	技術的難易度が高いTMR市場では日本企業のプレゼンスが高い	グローバルに複数プレイヤーが存在	グローバルに複数プレイヤーが存在

1. Micro Electro Mechanical Systems、微小な機械構造や電子回路を組み合わせたデバイス技術; 2. Tunnel Magneto-Resistanceという方式の磁気センサ;
 3. Giant Magneto-Resistanceという方式の磁気センサ 4. Global Positioning Systemはアメリカが運用する全地球測位システムで衛星測位技術を利用
 Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



ジャイロスコープは用いている原理によって分類される

ジャイロスコープの分類

ジャイロスコープとは		<ul style="list-style-type: none"> 時間あたりの角度の変化量 (角速度) を検出する道具。ジャイロ/ジャイロセンサとも呼称される。船舶や航空機、ロケットの自律航法等に使用される 用いる原理により、「量子式」、「光学式」等に分類される 				
		量子式	光学式	流体式	機械式	
原理	物理効果	<ul style="list-style-type: none"> 波の干渉を応用したジャイロスコープ <ul style="list-style-type: none"> 複数の波が重なり合うことで新しい波形が生じる現象 (左図) を利用 加速度によって生じた2つの波の干渉パターン (右図) の変化を読み取ることで加速度の評価が可能 用いている波 (媒質) の波長が短いほど、わずかな干渉の変化を反映できるので精度が高くなる 		<ul style="list-style-type: none"> 慣性力を応用したジャイロスコープ <ul style="list-style-type: none"> 動いている物体に対して外力が加わると、見かけの力 (慣性力) が外力に対して逆向きに働く現象を利用 慣性力は物体の速度・質量・角加速度に比例し、慣性力の変化を測定することで、間接的に加速度の評価が可能 		
作用の対象 (媒質)		物質波 ¹ <ul style="list-style-type: none"> 数nmの波長 	可視光や近赤外線 <ul style="list-style-type: none"> 数百nm~数千nmの波長 	流体(気体や液体)	回転しているコマや振動素子	
<p>量子式ジャイロスコープの媒質である量子性を持つ「物質波」は、現状用いられている光学式の媒質である「光」よりも数百倍程度波長が短いため、精度が非常に高い</p>						

1. 物質が量子力学的な波としての性質を持つ(波動性と粒子性を同時に持つ) 状態のこと
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



ジャイロスコープは方式によってサイズや精度が異なり、それぞれ適した用途で用いられる

ジャイロスコープの分類 [1/2] : 特徴/用途

方式	量子式	光学式	流体式	機械式	
	量子ジャイロスコープ	光ファイバジャイロ (FOG)	リングレーザジャイロ (RLG)	MEMSジャイロ	
特徴					
精度 (°/hour) ¹	超高精度 <ul style="list-style-type: none"> 0.00001°/hour 	高精度 <ul style="list-style-type: none"> 0.001~0.0001°/hour 	高精度 <ul style="list-style-type: none"> 0.0035°/hour 	中程度 <ul style="list-style-type: none"> 0.07°/hour 	低い <ul style="list-style-type: none"> 0.02°/hour (3軸測る場合は精度が落ちる)
耐久性	n/a <ul style="list-style-type: none"> 用いるレーザーの耐久性に大きく依存 	高い <ul style="list-style-type: none"> 2-3年に一度メンテナンスの必要がある 	高い <ul style="list-style-type: none"> 1年に一度メンテナンスの必要がある 	中程度 <ul style="list-style-type: none"> 3-6か月ごとにガス漏れの確認が必要 	高い <ul style="list-style-type: none"> 3-4年の耐用年数があり、期間中のメンテナンスは不要
サイズ	大 <ul style="list-style-type: none"> 将来的に30~40cm立方 (現在は小部屋程度) 	中 <ul style="list-style-type: none"> 15 cm立方 	中~大 <ul style="list-style-type: none"> 15~25cm 立方 	中~大 <ul style="list-style-type: none"> 15~40 cm立方 	小 <ul style="list-style-type: none"> 数cm立方
費用	極めて高価	高価	高価	中程度	安価
対応環境	<ul style="list-style-type: none"> 温度変化に強い 振動にも強い 	<ul style="list-style-type: none"> 温度変化に弱い 高圧に弱い 	<ul style="list-style-type: none"> 温度変化に強い 振動に強い 	<ul style="list-style-type: none"> 振動に強い 	<ul style="list-style-type: none"> 低消費電力 振動に強い
主な用途	航空・宇宙・防衛 <ul style="list-style-type: none"> 無人潜水艦 極超音波ミサイル 地震観測 	航空・宇宙・防衛 <ul style="list-style-type: none"> 潜水艦 人工衛星 宇宙探査機 	商用 <ul style="list-style-type: none"> 民間航空機 民間船舶 	商用 <ul style="list-style-type: none"> 民間航空機 民間船舶 車 	商用 <ul style="list-style-type: none"> スマートフォン 車 ドローン

1. ジャイロスコープが自己発熱等の影響で出力がわずかにずれてしまう現象 (バイアス) による変動量の標準偏差 (バイアス安定性) をとったもので、一定時間当たりのずれで表す。ジャイロスコープにおける精度指標
 Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子ジャイロスコープは、原子時計や真空チャンバ等、他方式と共通する部品を有する一方、アトムチップや原子干渉計等、独自のものも持つ

ジャイロスコープの分類 [2/2] : プレイヤーと構成部品

- : 量子ジャイロスコープに用いられるものと**共通**の部品・技術
- : 量子ジャイロスコープに用いられるものと**類似**の部品・技術
- : 量子ジャイロスコープに用いられるものと**異なる**部品・技術

方式		量子式	光学式		流体式	機械式
		量子ジャイロスコープ	光ファイバジャイロ (FOG)	リングレーザジャイロ (RLG)	ガスレートジャイロ	MEMSジャイロ
主要構成部品 ¹	媒質	アトムチップ	レーザー			
		原子冷却システム	光ファイバー	ミラー・プリズム	ガス	振動子
検出システム		原子干渉計	光学干渉計			
					力覚センサー・位置センサー	
		原子時計				
その他 (外装・電源等)		真空チャンバ				
		電源装置				

1. 現在多くの国が取り組む冷却原子方式の場合;
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子ジャイロスコープは各構成部品が大きくなりやすく、小型化が課題として残る

概要・技術的課題

概要

- 原子を冷却することで量子化し、量子ビーム同士の干渉パターンを解析することで角速度を測定する
 - 原子にレーザーを照射することでドップラー冷却¹を行い、量子化
 - 量子化した原子ビームはアトムチップ上で環状に回転
この際、経路を2つに分け、再結合することにより干渉が発生²
 - 角速度が加わると干渉パターンが変化
- 精度・耐久性が従来のジャイロスコープを凌駕するため、防衛用途や航空・宇宙分野などでの活躍が期待される
 - 光波より短い波長による高い分解能
 - 冷却原子による、振動や温度変化に対する高い位相安定性
- 軍用は2030年頃、商用は2035年頃の実用化が見込まれる
 - アメリカのスタートアップによる実証実験の事例も存在

技術的課題

量子状態の維持

- ドップラー冷却を行い、原子を10マイクロケルビン(-273.15°C)程度まで温度を下げることで、量子状態を保っている
- 冷却用レーザーは高い波長安定性・出力安定性が求められる
- 一般的に $10^5 \sim 10^9$ 個程度のルビジウム原子をトラップの必要あり
 - 原子数が多いほど干渉計の感度は向上
 - 一方で、原子数が増えすぎると、原子同士の相互作用でノイズ/トラップの安定性維持が難しくなる

ノイズの除去

- 磁場や温度変化などの外部環境ノイズは、性能に大きく影響を与え、ノイズを除去するために装置全体を真空チャンバで囲う必要がある
- 長時間、超高真空状態³を保つためには、高い密封性や強力な真空ポンプが必要となる

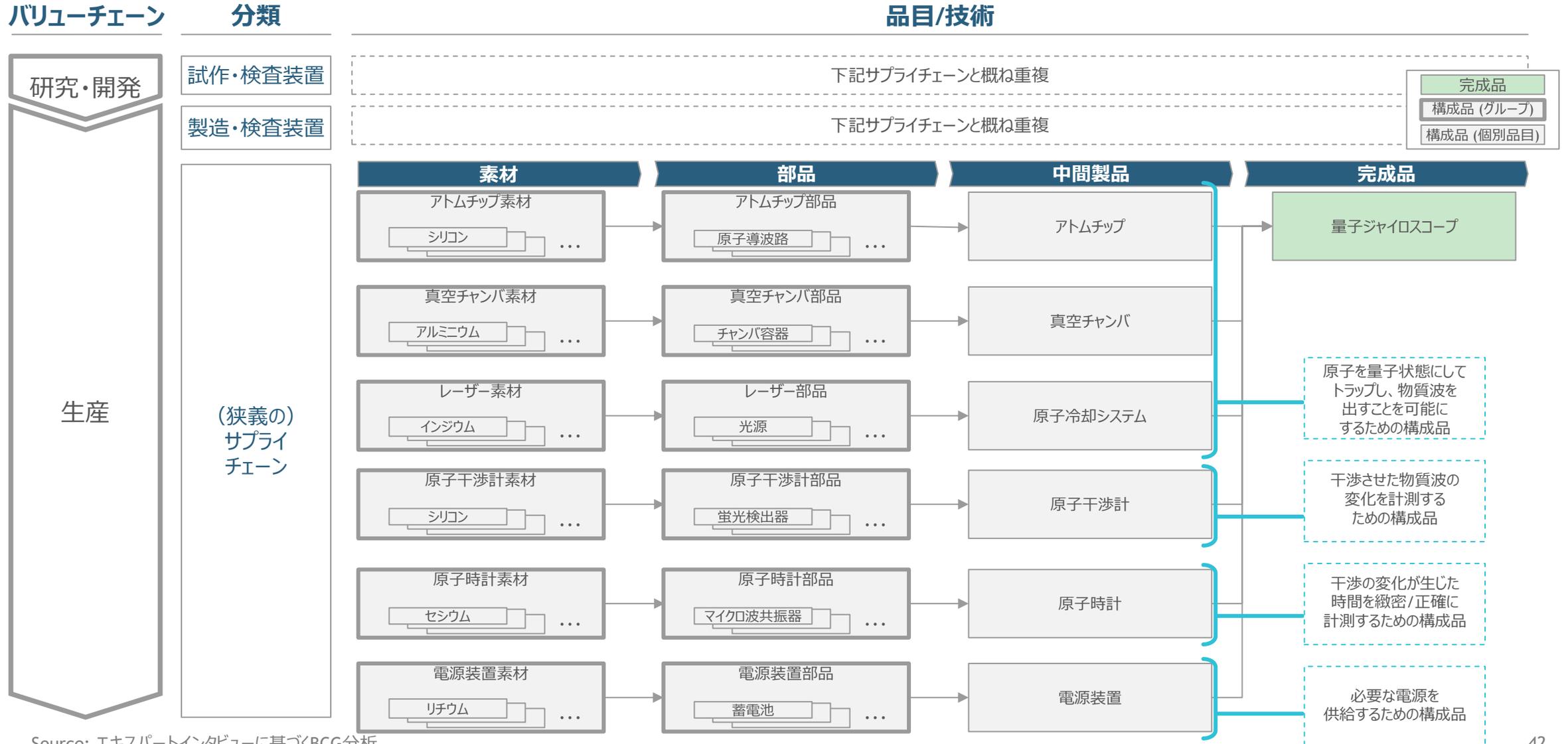
小型化

- 真空チャンバや干渉計、冷却用レーザーなどの構成部品は大型化しやすく、実用に向けては小型化が必須となる
 - 現在は小部屋ほどの大きさだが、30~40 cm立方程度の大きさにすることが期待

1. 原子に特定の波長の光を照射すると、原子の運動エネルギーが失われ温度が下がる現象；2. 1つのアトムチップでx軸、y軸、z軸のすべての回転を計測できるかは量子ジャイロの設計に依存。複数のアトムチップを使う場合、3軸それぞれに独立した干渉計を構成し、各軸の回転を個別に測定。精度は向上する可能性があるが、サイズ/コストが増加する可能性。1つのアトムチップに3次元的な光格子や導波路を形成することで、1つのアトムチップで3軸計測可能な量子ジャイロを開発も進める動きあり；3. 極めて低い圧力の真空状態を指し、通常は 10^{-9} パスカル (Pa) 以下の圧力と定義



量子ジャイロスコープのバリューチェーン/サプライチェーン (全体像)



Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子ジャイロスコープ 全体の重要技術サマリ [1/5] : 完成品/主要構成部品 (1/2)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
量子ジャイロスコープ、 アトムチップ ¹ 、原子導波路	A社、B社、C社、D社、 E社、F社、G社、H社	=> 量子状態 ² の維持等に係る技術を向上/管理する必要
真空チャンバ ³ 、真空ポンプ、 チャンバ容器	A社、B社、C社	=> 強度/省スペース化等に係る技術を向上/管理する必要
原子冷却システム ⁴ 、 ダイオードレーザー	A社、B社、C社 D社、E社	=> 小型化と高精度に係る技術を向上/管理する必要

1. 原子をトラップする素子; 2. 物質が、粒子と波の特性を持った状態; 3. 冷却原子を格納するチャンバ; 4. 原子の冷却に用いるレーザーを中心としたコンポーネント;
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子ジャイロスコープ 全体の重要技術サマリ [2/5] : 完成品/主要構成部品 (2/2)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
原子干渉計 ¹	A社、B社、C社、D社、 E社、F社、G社	=> 小型化/省電力化等を確保していく必要
原子時計 ² 、 マイクロ波共振器 ³	A社、B社、C社、D社	=> 小型化/高精度の両立を確保していく必要

1. 原子の物質波への干渉を計測することで、角速度の計測を可能とするコンポーネント; 2. 原子の超微細な固有共鳴周波数を計測に利用した超高精度時計; 3. 特定の周波数のマイクロ波を発生させる装置
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子ジャイロスコープ 全体の重要技術サマリ [3/5] : 重要品目 (量子ジャイロで特に重要となるもの)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
光検出器 ¹ 、APD ²	A社、B社	=> 高精度を実現する技術等を管理/向上する必要
コリメートレンズ ³	A社、B社、C社、D社、E社	=> 高精度を実現する技術等を管理/向上する必要

1. 原子干渉計、原子時計の計測結果の検出に用いる感光デバイス; 2. Avalanche Photodiode; 3. レーザビームを平行光(コリメート光)にするレンズ;
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子ジャイロスコープ 全体の重要技術サマリ [4/5] : 重要品目 (量子ジャイロ以外にも広く使われるもの) (1/2)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
パルスレーザー ¹	A社、B社、C社	=> レーザー光の制御や小型化等を推進する必要
電磁鋼板 ²	A社、B社、C社	=> 薄さと剛性の両立のための製造プロセス向上/技術の適切な管理の必要
DRAM ³	A社、B社、C社、 D社、E社	=> 高性能化とコスト低減等を引き続き推進していく必要

1. 一定の繰り返し周波数で光を出力するレーザー; 2.ポンプのモーターコア (鉄芯)等に用いる特殊な鉄鋼材料; 3. Dynamic Random Access Memory; 揮発性メモリの一種
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



量子ジャイロスコープ 全体の重要技術サマリ [5/5] : 重要品目 (量子ジャイロ以外にも広く使われるもの) (2/2)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
InP基板 ¹	A社、B社、C社	=> 製造プロセスにおける調整等の技術向上/適切な技術管理の必要
光学ガラス ²	A社、B社、C社	=> コーティング等、加工技術等を管理する必要

1. インジウムリン。光通信における発光・受光素子として活用される; 2. レンズ等の光学部品に用いる専用ガラス
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析

Agenda

- 1) 本事業のゴール / 調査方針
- 2) 各調査項目概要
 - 2-1) 超電導MRI
 - 2-2) RFモジュール
 - 2-3) 中性原子方式量子コンピュータ
 - 2-4) 量子ジャイロスコープ
 - 2-5) 6G基地局

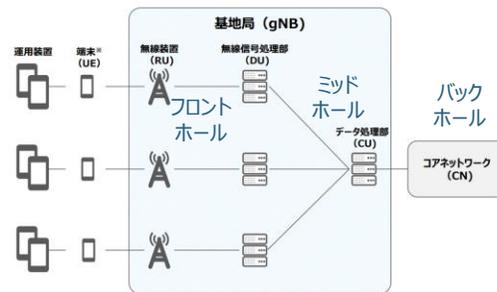


6Gは、5G以上の高速大容量化、低遅延、多数同時接続に加え高信頼、省電力を目指す

概要・技術的課題

概要

- 基地局は、RU (Radio Unit), DU (Distributed Unit), CU (Central Unit)の3つのユニットに分けられる
 - RU、DU、CU間はそれぞれフロント/ミッド/バックホールと呼ばれる光回線で接続されている



[6G基地局の全体像]

- 6Gは5G以上に高周波を扱うが、高周波数ほど電波が長距離に伝播しづらいため、安定した通信環境の構築のためにアンテナ数を増やす必要がある
- また、今後の更なる高速大容量化、通信網の冗長化ニーズに応えるため、**基地局のオープン化、仮想化が研究されている**
 - オープン化・・・基地局間のインターフェイスを標準化し、多様なベンダー同士の接続を可能にする
 - 仮想化・・・ソフトウェアをハードウェアから分離し、従来専用ハードウェアで行っていた信号処理を汎用サーバー上で行う

技術的課題

省電力化

- 通信の高速大容量化・基地局の増加に伴い消費電力が増大
- 高周波になるほど電力損失が増加し、発熱量も増加するため、電力損失の抑制が求められる
- 更に、AI導入による演算や装置制御の効率化等によって消費電力抑制が検討されている

信頼性向上

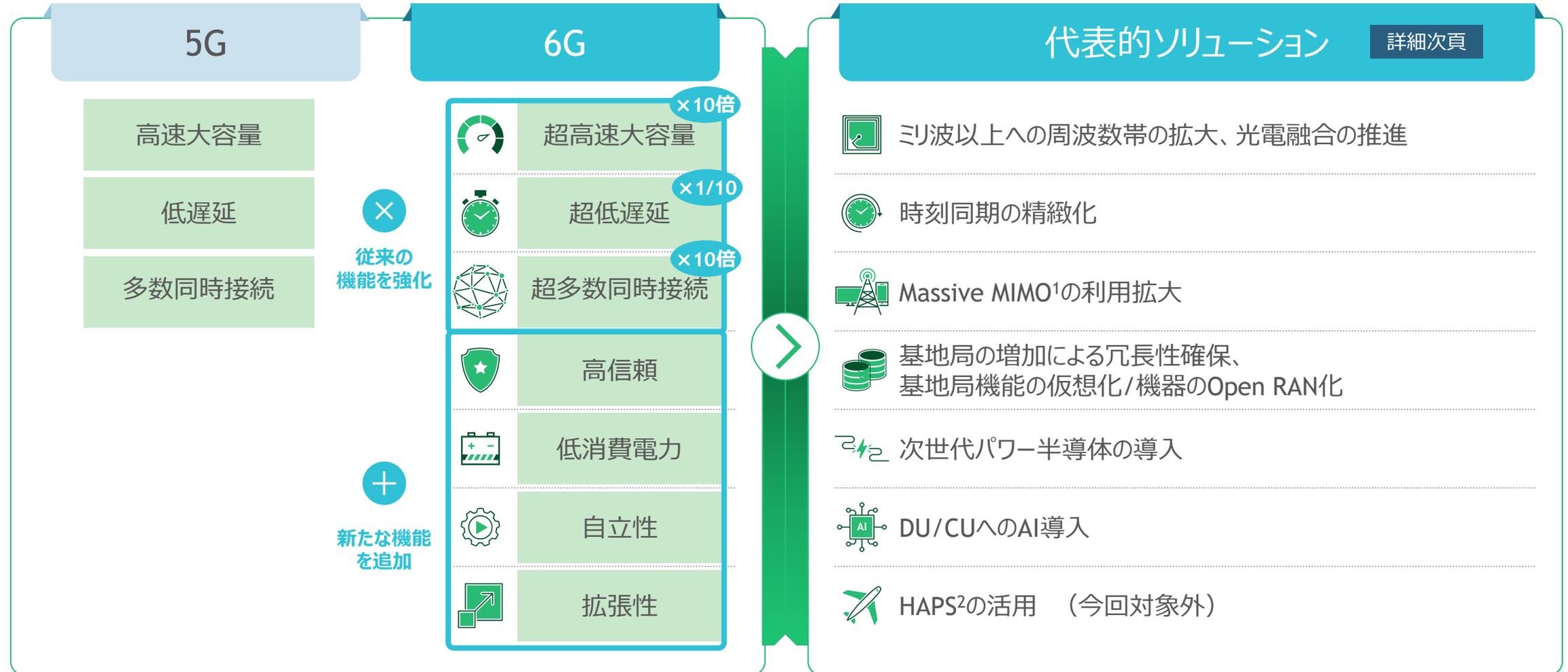
- より多数の機器がインターネットに接続されるため、通信障害の社会への悪影響が甚大となるため、信頼性がより重要となる
- 装置や部品に不具合が発生した場合に備えてバックアップを持たせることなどによる冗長性の確保が必要となる

放熱機能

- 高周波、通信の高速大容量化に伴って電力損失が増加するため機器が発熱しやすい
- 一定の温度を超えると装置・部品のパフォーマンス低下や故障に繋がるため、放熱機能が重要となる



5G⇒6Gへの移行で目指す姿



1. MIMOとは、Multi Input/Multi Outputの略。大量のアンテナとビームフォーミング技術などにより、一人ひとりに専用の電波を割り当てることで高速通信を実現する技術

2. High Altitude Platform Station、宇宙空間を含めた地球の上空に、通信衛星等の飛行体を用いて通信ネットワークを構築する非地上系ネットワーク

Source: 総務省資料、エキスパートインタビューに基づくBCG分析



6G実現に向けた主な技術革新

求められる技術	6Gで実現を図る特性							関連する主な品目等
	超高速大容量	超低遅延	超多数同時接続	高信頼	低消費電力	自立性	拡張性	
光電融合の推進	✓	✓	✓		✓			光電融合技術 InP基板
Massive MIMO の利用拡大	✓	✓	✓					プロセッサ(CPU) アクセラレータ (GPU) LTCC
ミリ波以上への周波数帯の拡大	✓	✓	✓					高周波フィルタ パワーアンプ DPD MLCC LTCC
次世代パワー半導体の導入	✓				✓			GaN
時刻同期の精緻化		✓						水晶発振器
DU/CUへのAIの導入					✓	✓		アクセラレータ (GPU) DRAM HDD SSD
基地局の増加による冗長性確保				✓				ソフトウェア
基地局機能の仮想化/ 機器のOpen RAN化				✓				ソフトウェア



6G基地局 全体の重要技術サマリ [1/7] : 基地局完成品/主要構成部品

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
基地局 RU ¹ DU ² CU ³	A社、B社、C社、D社、E社	=> 省電力化や信頼性向上等を図っていく必要
ソフトウェア	A社、B社、C社、D社、 E社、F社	=> 演算処理の効率化等を図っていく必要
CPU (Central Processing Unit)	A社、B社、C社、D社、E社	=> 省電力化や信頼性向上等を図っていく必要
GPU (Graphical Processing Unit)	A社、B社	=> 省電力化と性能向上等を図っていく必要

1. Radio Unit, 基地局と端末間の無線通信機能を担うユニット; 2. Distributed Unit, 信号の変調・復調等を行うユニット; 3. Central Unit, RU、DUの制御等を行うユニット;
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



6G基地局 全体の重要技術サマリ [2/7] : 重要品目 (6G基地局で特に重要となるもの) (1/2)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
水晶発振器 ¹ 水晶振動子 人工水晶	A社、B社、C社	=> 安定性/信頼性を確保/向上していく必要
LTCC ² デバイス、LTCC	A社、B社、C社、D社、E社	=> 配合/焼成等の技術向上/ノウハウ管理の必要
LTCC (焼成炉)	A社、B社	=> 製造プロセスに係るノウハウを管理していく必要

1. 水晶を用いて高い周波数精度で時計等の基準信号を生成する装置; 2. Low Temperature Cofireable Ceramices, 高周波部品の製造に向け開発されたセラミックス
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



6G基地局 全体の重要技術サマリ [3/7] : 重要品目 (6G基地局で特に重要となるもの) (2/2)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
InP ¹ 基板	A社、B社、C社	=> 製造プロセスにおける調整等の技術向上/適切な技術管理の必要
光電融合技術	A社、B社、C社 等	=> 伝送の効率化/デバイス小型化等を行っていく必要

1. インジウムリン。光通信における発光・受光素子として活用される
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



6G基地局 全体の重要技術サマリ [4/7] : 重要品目 (6G基地局以外にも広く使われるもの) (1/4)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
MLCC ¹ [デバイス本体]	A社、B社、C社、D社	=> 小型化/高容量化等の技術を適切に管理する必要
MLCC [製造装置]	<p>粉碎・分散機: A社、B社、C社</p> <p>ミキサー: D社、E社</p> <p>シート成形機: F社、G社</p> <p>焼成炉: H社、I社</p>	=> 製造プロセスに係る技術を適切に管理する必要
窒化アルミニウム	A社、B社	=> 製造プロセスに係る技術を適切に管理する必要

1. Multi Layered Ceramic Capacitor, 電圧の安定化や信号ノイズの除去を担う
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



6G基地局 全体の重要技術サマリ [5/7] : 重要品目 (6G基地局以外にも広く使われるもの) (2/4)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
チタン酸バリウム	A社、B社、C社、D社	=> MLCCに合わせた独自の配合等の技術を適切に管理する必要
高周波フィルタ (BAWフィルタ ¹)	A社、B社、C社、D社、 E社、F社	=> 要求を満たす高い設計/生産等の技術を適切に管理する必要
パワーアンプ	A社、B社、C社、D社	=> 電力効率の向上等を適切に管理する必要

1. Bulk Acoustic Wave。特定の周波数の電気信号を取り出すフィルタの一種;
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



6G基地局 全体の重要技術サマリ [6/7] : 重要品目 (6G基地局以外にも広く使われるもの) (3/4)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
パワー半導体、GaN	A社、B社、C社、D社、E社	=> 性能向上につながる製造技術等を適切に管理する必要
DPD ¹ 、DPDコア	A社、B社、C社、D社、 E社、F社	=> 高性能化に繋がる回路設計技術等を適切に管理する必要
DRAM/HBM ²	A社、B社、C社	=> 高性能化とコスト低減等を引き続き推進していく必要
SSD ³ 、NANDフラッシュメモリ ⁴	A社、B社、C社、D社、 E社、F社	=> 高性能化とコスト低減等を引き続き推進していく必要

1. Digital Pre-Distortion。パワーアンプの効率を上げるための半導体素子; 2. Dynamic Random Access Memory; 揮発性メモリの一種。HBM(High Bandwidth Memory)は、従来型よりも一度に大きなデータをやり取りできるDRAMの一種; 3. Solid State Drive; 4. 不揮発性であるNANDフラッシュメモリを用いた大容量記憶媒体
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



6G基地局 全体の重要技術サマリ [7/7] : 重要品目 (6G基地局以外にも広く使われるもの) (4/4)

品目	主なプレイヤー	経済安保上の対応方針 (案)
HDD ¹	A社、B社、C社	=> 高性能化とコスト低減等を引き続き推進していく必要
磁気ヘッド ² 、 TMR素子 ³ [デバイス本体]	A社、B社、C社	=> 高性能化とコスト低減等を引き続き推進していく必要
磁気ヘッド、TMR素子 [製造装置]	<u>ダイシング装置</u> A社 <u>成膜装置</u> B社	=> 製造プロセスに係る技術を適切に管理していく必要
プラッタ ⁴	A社、B社、C社	=> 製造プロセスに係る技術を適切に管理していく必要

1. Hard Disk Drive。磁気ディスクの記憶媒体; 2. HDDのディスクに情報を書き込み、読み出しを行う部品; 3. 磁気センサ(磁界の大きさや変化量を電気信号に変換する素子)の一種。Tunnel Magneto Resistance 効果を用いる; 4. HDDの情報が格納される磁性ディスク
Source: エキスパートインタビューに基づくBCG分析



[bcg.com](https://www.bcg.com)