「重希土フリー磁石の高耐熱・高磁力化技術」 に関する研究開発構想(個別研究型)

令和5年10月

内閣府 経済産業省

目次

1. 事業の背景、目的、内容	3
(1)事業の目的	3
① 政策的な重要性	3
② 我が国の状況	4
③ 世界の取組状況	5
④ 本事業のねらい	6
(2)事業の目標	7
① アウトプット目標	7
② アウトカム目標	7
(3)事業の内容	8
ア. 研究開発の必要性	
イ. 研究開発の具体的内容	
ウ.達成目標	
2. 実施方法、実施期間、評価、社会実	装に向けた取組10
(1) 事業の実施・体制	10
(2)事業の実施期間	10
(3)評価に関する事項	11
(4)社会実装に向けた取組	12
(5)総予算	12
(6)経済産業省の担当課室	12
3. その他重要事項	13
(1)研究開発成果の取扱い	13
① 共通基盤技術の形成に資する成界	艮の普及13
② 標準化施策等との連携	13
③ 知的財産権の帰属、管理等の取扱	及い13
(2)「研究開発構想」の見直し	13
(3)研究開発の対象経費	14
4. 研究開発構想の改定履歴	14

1. 事業の背景、目的、内容

(1) 事業の目的

① 政策的な重要性

永久磁石は、自動車等の輸送機器、口ボット等の産業機器、風力発電等のエネルギー関連機器、携帯電話等の電子・通信機器、冷蔵庫・エアコン等の家電等の身の回りにある様々な機器から、航空機、人工衛星等に至るまで、民生機器、公的機器問わず様々な用途で用いられるモーターの性能を決定づける基幹部品であり、国民の生活・安全を守る上での重要な技術である。

表1 永久磁石開発における 我が国の貢献

磁石	発明者	発明年
KS鋼	本多光太郎	1917
フェライト磁石	加藤与五郎 武井武	1930
MK鋼	三島徳七	1932
アルニコ磁石	米GE社	1943
サマコバ磁石	米空軍 (工業化は日本)	1968
鉄 - クロム - コバルト磁石	金子秀夫 本間基文	1970
ネオジム磁石	佐川眞人	1983
サマリウムー鉄 -窒素磁石	入山恭彦	1987

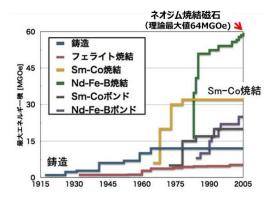


図1 磁石性能の向上の推移 (出典:NEDO「次世代自 動車向け高効率モーター 用磁性材料技術開発」報 告書(2022年5月))

キャッチアップしてきている状況にあり、自国で資源を有するコスト競争力を 背景に、現在、ネオジム磁石の世界シェアについては、特定国が 8 割を超える シェアを獲得するに至っている(残りはほぼ我が国で、他はドイツ等に少量の 生産があるのみ)。 また、サプライチェーンに関し、ネオジム磁石は主に軽希土類であるネオジム、鉄、ホウ素からなるが、耐熱性に乏しいことからジスプロシウムやテルビウムといった重希土類を添加することで耐熱性を確保している。ネオジム等の軽希土類について、2010年頃には特定国が世界シェアをほぼ100%占めるに至っていたが、豪マウントウェルド鉱山でのレアアース鉱石採掘とマレーシアにおける精製処理等、特定国以外でのサプライチェーンが新たに生まれ、これによりネオジムの特定国への依存度は一定量下がっている。しかしながら、今後、電動車や風力発電の普及によりネオジム磁石の需要が急速に拡大することが見込まれており、世界的なネオジム磁石生産の拡大により特定国への依存のリスクが再び高まる可能性がある。ジスプロシウム、テルビウムに関しても特定国がほぼ100%の世界シェアを占める状況は変わっておらず、世界中が依存している状況に変わりはない。2023年3月に豪ライナスによる重希土生産開始が公表され、今後商業規模として唯一のジスプロシウム及びテルビウムの生産が開始される見込みであるが、現状のネオジム磁石生産量であっても我が国の需要を満たすことは難しく、重希土類で特定国に依存する状況は残ると予想される。

以上のように、現在、特定重要物質である永久磁石の技術優位性と供給安定性が危ぶまれており、サプライチェーンリスクの低い元素からなり、ネオジム磁石を代替・凌駕する次世代磁石の開発を推進すべく、政府戦略では 2021 年策定の「マテリアル革新力強化戦略」にて重希土フリーの磁石の開発・普及を進めることとしている他、同 2021 年策定の「グリーン成長戦略」において希少金属の使用量を削減・代替する技術開発を進めることとしている。

経済安全保障技術育成プログラムの研究開発ビジョン(第二次)においても、 領域横断・サイバー空間領域で支援対象とする技術として

● 省レアメタル高機能金属材料(重希土フリー磁石の高耐熱・高磁力化技術) が挙げられている。

本研究開発構想では、研究開発ビジョンに定められた省レアメタル高機能金属材料を開発するため、個別研究型として上記の重希土フリー磁石の高耐熱・高磁力化技術を研究開発し、磁石の高耐熱化・高磁力化と資源リスクの低減を通して、磁石並びに磁石を用いる製品の優位性を維持・拡大することを目的とする。

② 我が国の状況

我が国は技術力を有する磁石メーカーに加え、世界的な自動車メーカーやエアコンメーカー、各種モーターメーカー等の有力な磁石ユーザーの双方が国内

に存在することもあり、高性能モーター向け高耐熱性・高磁力な永久磁石において高いシェアを維持している。一方、他国製のネオジム磁石の性能キャッチアップにより高性能永久磁石の市場においても厳しい競争にさらされている。そのため、ネオジム磁石の性能を維持もしくは向上しつつ、原材料の特定国依存を減らすため、省レアアース磁石の開発を推進している。一方で、ネオジム磁石における理論上の性能の限界に近い数字まで開発が進んでいることから、次世代磁石の開発を進めていくことも重要である。

図2に、次世代磁石候補として現在報告されている磁石について、電動車駆動モーター等の高性能モーターの要求耐熱温度(200°C)における物性値を示す(横軸の飽和磁化は磁石の強さを示す物性値、縦軸の異方性磁界は磁石の保磁力の理論値とされる物性値であり、右上ほど高いポテンシャルを有する磁石を示している)。ネオジム磁石を超える物性値を有する磁石材料は多くの候補があるようにも見えるものの、現時点でネオジム磁石に比べ、高耐熱性・高磁力となるポテンシャルを有し、かつサプライチェーンリスクの低い磁石としてはSm-Fe 系磁石となる。加えて、異方性磁界は低いものの、保磁力の温度変化が極めて小さい磁石として Fe-Ni 磁石が候補として挙げられる。

Sm-Fe 系磁石、Fe-Ni 磁石は、ともに高いポテンシャルを有することが知られているが、これまで、その製造の難しさから高い磁気特性を発現させること

ができていなかった。これに対し、近年、次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発(NEDO事業、2014-2021)、部素材の代替・使用量削減に資する技術開発・実証事業(NEDO事業、2020-2021)により、Sm-Fe 系磁石、Fe-Ni 系磁石ともに我が国において顕著な性能向上が認められ、その実現可能性は高まっている。

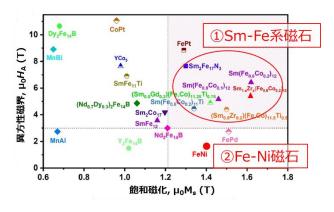


図 2 200°Cにおける各磁石物性値(出典: 「Scripta Materialia 194 (2021) 113686」に Fe-Ni の予想値を追加プロット)

③ 世界の取組状況

欧米においては、経済安全保障の観点から、特定国の永久磁石に過度に依存している現状のリスクを認識し、域内での永久磁石サプライチェーンの構築、永久磁石の開発を進めている。EU では欧州重要原材料法の改正案が 2023 年 3

月に公表され、重要原材料の EU 域内生産、域内加工処理、域内リサイクルに おけるベンチマークを設定する見込みとなっており、永久磁石のサプライチェ ーンリスク低減を支援している。磁石開発に関し、欧州では 2014 年から 2020 年の間、「Horizon2020」において 45 の磁石関係のプロジェクトが遂行された。 最近では、ドイツの Darmstadt 工業大学と Duisburg-Essen 大学が連携した 「HoMMage」と呼ばれるプログラム「The Collaborative Research Centre/Transregio (CRC/TRR) 270」がドイツ研究振興協会 (DFG) のファン ディング(12 m€)により磁石材料と軟磁性材料分野を主対象とした研究開発 を行っている (2020 年から 4 年間)。 他に、PASSENGER プロジェクト(11m€、 2021-2025)で代替磁石開発を行っているほか、Horizon 2023/2024 にてレアア ース及び磁石のイノベーションハブの支援(16m€×2)等が公表されている。 米国では通商拡大法 232 条に基づく調査結果を踏まえ、永久磁石のサプライチ ェーン確保に向けた今後の取組方針を公表している。関連して、米国内でレア アース鉱石採掘を行う、MP マテリアルズへの軽希土、重希土分離設備投資支 援等が行われている。また、2013 年に創設された Critical Materials Institute (DOE: Department of Energy が主導)において、多数の企業や大学の連携の もと、2018年からの第2期プロジェクトで永久磁石も一つの課題として研究開 発が実施されている。

重希土フリー磁石・レアアースフリー磁石に関し、欧米等でも研究開発は行われているが、現状はまだ磁石粉末合成の基礎研究段階にある。磁石粉末合成から性能向上の段階に進みつつある我が国は他国を大きくリードしている状況にあり、早期に社会実装を実現し、イニシアティブを獲得する必要がある。

④ 本事業のねらい

現在量産化されている各種ネオジム磁石とその代表的な用途を図3に示す。ネオジム磁石の中にも等方性ネオジムボンド磁石、異方性ネオジムボンド磁石、等方性・異方性ネオジム焼結磁石があり、その中に各種グレードの磁石が存在し、用途に応じて使い分けられている。本事業ではSm-Fe系磁石、及びFe-Ni

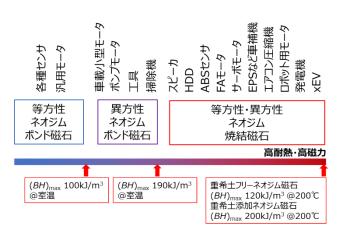


図3 各種ネオジム磁石と用途、その代表特性値

磁石といった次世代磁石の高耐熱化・高磁力化技術を駆使して、各種ネオジム 磁石を代替可能な磁石を開発する。これにより国民の安全・安心、経済活動に 密接に関わる永久磁石において、ネオジム磁石の代替技術によりサプライチェ ーンリスクの低減をねらう。さらに、ネオジム磁石の耐熱性や磁力を超える重 希土フリー磁石・レアアースフリー磁石開発は、電動車や航空・宇宙機器等、 各種モーターの小型軽量化・省電力化・高出力化に繋がり、磁石の優位性のみ ならず、最終製品としての優位性の獲得をねらう。また、これらの次世代磁石 が開発された際には、研究開発成果について積極的に国際社会へ発信を行い、 我が国のみならず、海外での利用も促進していく。

(2) 事業の目標

① アウトプット目標

重希土類を用いず、現在の最も大きな磁力がある磁石であるネオジム磁石を 凌駕する理論値を有する新規磁石候補は存在するものの、現状、磁石としての 磁力は低い。新規磁石候補の有する高い理論値を磁石として発現できるように する新規磁石製造技術を開発し、新規磁石の性能を引き出すためのモーターを 設計開発することで、図3に示した各種ネオジム磁石を代替可能な磁石の製造 プロセスを創出し、低資源リスクで高性能な各種モーター製品開発の基盤技術 を構築する。

② アウトカム目標

本事業を通して、各種ネオジム磁石を代替できる新規磁石の製造技術開発とモーターへの応用により早期の実用化へとつなげる。本事業により、これまでネオジム磁石の一択であった高性能磁石を、選択可能な状態にし、今後益々拡大するモーター需要に対するサプライチェーンリスクを低減する。また、2035年における電動車駆動用モーターの市場は 2.4 兆円/年と予測されており、ネオジム磁石の代替により創出される市場規模は小さくない。さらに、モーターの高性能化は自動車の軽量小型化や省エネルギー化に寄与する。また、これら新規磁石は重希土類元素添加ネオジム磁石では利用困難な温度域(>200°C)での耐熱性や放射線耐性も見込まれることから、ネオジム磁石の利用が困難であった過酷な条件下で用いられるモーターの高耐久化やモーター市場の新規開拓を期待できる。

(3) 事業の内容

本事業では重希土・ネオジムフリーレアアース磁石及び完全レアアースフリー磁石の次世代磁石の開発を対象とする。本事業で研究開発を実施する次世代磁石の開発は永久磁石の供給安定化、性能向上を図るものであり、永久磁石のみならず、モーターを用いた様々な製品に関して我が国の優位性を維持・確保するうえで極めて重要な技術である。次世代磁石候補として Sm-Fe 系磁石と Fe-Ni 磁石が挙げられるが、実用化まで時間を要し、かつ技術難易度が高い事業であることから、以下の研究開発は全て委託で実施するものとする。

ア. 研究開発の必要性

ネオジム磁石は前述のとおり、性能向上の余地があまり残されていないこと、 重希土のサプライチェーンリスクが存在することから、永久磁石に係る我が国 の優位性の喪失と供給不安定化が危ぶまれるところである。永久磁石の供給安 定性向上、そして更なる性能向上のためにも、サプライチェーンリスクが低い 原料からなり、かつ各種モーターに用いられるネオジム磁石を代替し、将来的 には凌駕する次世代磁石が求められている。現状、ネオジム磁石を凌駕する可 能性のある重希土・ネオジムフリーなレアアース磁石としては Sm-Fe 系磁石が あげられる。Sm もレアアースであるが、世界各地のレアアース鉱石に含まれて おり、地域偏在性は低い。また、Sm-Fe 系磁石の磁石性能の理論値となる飽和 磁化、異方性磁界は、ともにネオジム磁石を凌駕する。近年ではデータ駆動型 材料開発による性能向上など、継続的に研究開発が進められている。さらに、 キュリー温度もネオジム磁石よりも高いことから磁石性能の温度低下も抑制で き、高耐熱・高磁力な次世代磁石の第一候補となる。一方、サプライチェーン リスクに鑑みるとレアアースを含まない磁石が理想的である。レアアースを含 まず、ネオジム磁石を超える可能性がある磁石候補は現状、Fe-Pd 磁石、Fe-Pt 磁石、Fe-Ni 磁石に限られる。貴金属を磁石で利用することは現実的ではない ため、レアアースフリー磁石としては Fe-Ni 磁石が唯一の候補となる。 Fe-Ni 磁 石の異方性磁界(保磁力の理論値とされる物性値)はネオジム磁石に対して低 いものの、Fe-Ni 磁石の保磁力の温度変化は極めて小さい見込みであることか ら高温下で使用されるモーターにおいて、ネオジム磁石を超える磁力となる可 能性がある。

従来のネオジム磁石の鉱石主相が安定相であるのに対し、次世代磁石候補の Sm-Fe 系磁石や Fe-Ni 磁石は、ともに磁石主相が準安定相であるため、ネオジム磁石など従来磁石で行われてきた 1000°C前後での高温下における磁石粉末 製造技術や焼結技術、粒界相制御技術など高耐熱・高磁力を発現させるための各種磁石製造技術を適用しようとしても結晶構造が変化してしまい、高性能な磁石とならない。そのため、現状ではまだまだ性能が低く、実用化に至るにはこれら磁石の有する高いポテンシャルを引き出すための新しい磁石製造プロセスが必要となる。我が国が蓄積してきた知見と高い技術力に加えて、必要に応じて機械学習によるデータ駆動型アプローチを活用し、これを実現することでサプライチェーンリスクの低減のみならず、永久磁石としての我が国の優位性向上、そして永久磁石を用いる製品の優位性向上にも寄与することができる。

イ. 研究開発の具体的内容

(イ-1) 重希土・ネオジムフリーレアアース磁石の製造プロセス開発 重希土・ネオジムフリーレアアース磁石の第一候補となる Sm-Fe 系磁石に 適した粉末製造及び固化・成形技術といった製造プロセスを新たに開発する。 また、重希土・ネオジムフリーレアアース磁石特性に適したモーター設計開発 を行うことで、その実用化を促進する。

(イ-2) 完全レアアースフリー磁石の製造プロセス開発

完全レアアースフリー磁石候補の Fe-Ni に適した粉末製造及び固化・成形技術といった製造プロセスを新たに開発する。また、完全レアアースフリー磁石特性に適したモーター設計開発を行うことで、その実用化を促進する。

ウ. 達成目標

ネオジム磁石を超える高耐熱で高磁力な重希土フリー磁石・レアアースフリー磁石の開発、及び低資源リスクで高性能なモーター製品開発の基礎基盤構築には 10 年以上を要する。そのため本事業では、図 3 に示した各種ネオジム磁石を代替できる Sm-Fe 系磁石、Fe-Ni 磁石の製造プロセス開発、及びこれら磁石を搭載するモーターの設計開発を目標とする。研究開始後 3 年を目途に等方性ネオジムボンド磁石を代替可能な磁石(室温での最大エネルギー積 110kJ/m³)の開発を目指す。本事業 5 年間には、高配向化・高密度化技術により耐熱性ネオジム焼結磁石の代替を可能にする特性(200°Cで最大エネルギー積 120kJ/m³)を持つ磁石の製造プロセス開発を目標とする。また、開発した磁石を搭載した各種モーターを設計開発する。本事業により、ネオジム磁石を代替する新規磁石の製造プロセスを構築し、モーターの設計開発を行うとともに、ネオジム磁石の製造プロセスを構築し、モーターの設計開発を行うとともに、ネオジム磁石の製造プロセスを構築し、モーターの設計開発を行うとともに、ネオジム磁

石を超える高耐熱化・高磁力化技術の課題抽出と有効な製造プロセスの指針を 得る。

2. 実施方法、実施期間、評価、社会実装に向けた取組

(1) 事業の実施・体制

本事業は、内閣官房及び内閣府が定める「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき事業を実施する。

研究推進法人(Funding Agency: FA)は、国から示された研究開発ビジョン及び研究開発構想に基づき、公募により研究開発課題を採択するとともに、その進捗管理・評価等の責務を担う。本事業の FA は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)である。

研究開発課題の実施責任者(以下「研究代表者」という。)の所属する機関は、国内に研究開発拠点を有し、我が国の法律に基づく法人格を有している機関とする(以下「研究代表機関」という)。また、研究代表者及び主たる研究分担者は我が国の居住者であることとする。(ここで言う居住者とは外為法の居住者(特定類型該当者を除く)であること。)

本事業の公募では、原則として、事業全体に対する提案を想定しており、研究代表機関が必要な分担機関と共同で事業全体を実施するものとする。

(2) 事業の実施期間

本研究開発構想に基づく本事業は 2024 年から 2029 年にかけての 5 年間とする。研究開発はステージゲート方式を採用し、図 4 に示すとおり、第 1 期(3年間)、第 2 期(2年間)の 2 つのフェーズで実施するものとする。

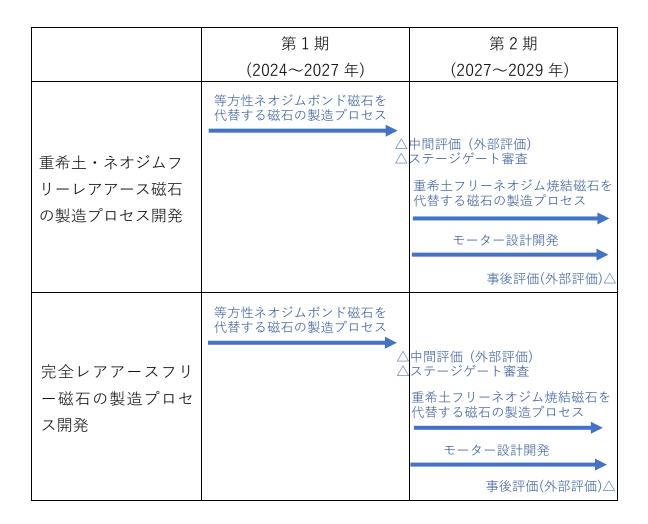


図4 研究開発のスケジュール

(3) 評価に関する事項

本事業は、「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき、評価を実施する。研究代表者は自己評価を毎年実施し、PO に報告する。 NEDO は外部評価として、中間評価を 2027年(事業開始から 3年目)、事後評価を 2029年(事業終了年)に実施することとする。事業の進捗等に応じて評価時期を早める場合は、PO 及び所管省庁と連携して、あらかじめ適切な実施時期を定める。

具体的な時期やステージゲート評価の目標等の設定については、担当する PO が採択時点でマイルストーンを含む研究計画とともに調整した上で、NEDO が決定するものとする。

(4) 社会実装に向けた取組

本事業は、経済施策を一体的に講ずることによる安全保障の確保の推進に関する法律(令和4年法律第43号)に基づく指定基金協議会を設置した上で推進していく。これにより、本事業によって生み出される研究成果等を活用し、民生及び公的な利用を促進するとともに社会実装につなげていくことを目指し、その実現に向け、潜在的な社会実装の担い手として想定される関係行政機関や民間企業等による伴走支援を可能とするとともに、参加者間で機微な情報も含む有用な情報の交換や協議を安心かつ円滑に行うことのできるパートナーシップを確立していく。

具体的には、本事業において各種ネオジム磁石を凌駕する新規磁石を開発することで、ネオジム磁石以外の選択肢を実現させ、サプライチェーンリスクの大幅な低減を行うことができる。さらには異方性ネオジム磁石を超える新規磁石を開発することで、電動車や航空・宇宙機器等の性能向上に寄与することができ、様々な分野において我が国の優位性を向上させることができる。また、これら新規磁石のリサイクル技術開発もサプライチェーンリスクの低減には重要な課題となるため、長期的な視野を持って取り組むことが必要となる。このため、永久磁石の利用を行う場合の将来的に想定される具体的なユースケースやその実現のために必要な機能等の情報を共有しつつ研究開発を進めることは、研究開発成果を将来の社会実装に円滑につなげていく上で、大きな意義がある。

本事業に係る協議会については、研究開発課題の採択後に、関係行政機関、PO、研究代表者等の協議会への参画者における十分な相談を行いつつ、運営していく。なお、協議会の詳細は別に示す。

(5) 総予算

本事業の総予算は34億円を超えない範囲とする。各研究開発項目、フェーズ毎の配分については、必要に応じて、経済産業省からの指導に基づき目安を示す。これを変更する場合も同様とする。

(6)経済産業省の担当課室

本事業の運営に係る経済産業省の担当課室は、製造産業局金属課とする。

3. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発課題実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。 経済産業省及び NEDO は、経済安全保障の観点を留意しつつ、研究開発課題実 施者による研究成果の広範な普及を促進する。

経済安全保障の観点から、経済産業省は必要に応じて NEDO に対して助言を 行い、NEDO は本助言を踏まえて、成果の普及について検討することとする。

② 標準化施策等との連携

永久磁石材料開発で得られた研究開発成果については、我が国の標準化等との連携を図ることとし、標準化に向けて開発する評価手法の提案、データの提供等を積極的に行い、事業終了後に必要な実施すべき取組のあり方及びより広範囲に適用先を広げるためのビジネスモデルについて立案する。

経済産業省、NEDO 及び研究開発課題実施者は、国際標準化に向けて積極的に役割を果たしていく。

③ 知的財産権の帰属、管理等の取扱い

研究開発成果を民生利用のみならず公的利用につなげていくことを指向し、社会実装や市場の誘導につなげていく視点を重視するという本プログラムの趣旨に則り、研究代表機関、研究代表者は、PO 及び研究分担者との協議の上、知的財産権の利活用方針を定めることとする。その際には、研究開発途中及び終了後を含め、知的財産権の利活用を円滑に進めることができるように努めることとする。

なお、研究開発成果の利活用にあたりその成果にバックグラウンド知的財産 権が含まれる場合には、その利活用についても同様に努めること。

(2)「研究開発構想」の見直し

経済産業省は、NEDO、PO及び関連省庁と連携して、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、事業内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて、達成目標、実施期間等、本研究開発構想の見直しを行う。

(3) 研究開発の対象経費

「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき、運用する。大学・研究開発法人等以外に関する間接経費の額の設定については、事業の性質に応じて経済産業省の担当課室から別に示す場合を除き、業務委託契約標準契約書に基づくものとする。

4. 研究開発構想の改定履歴

(1) 令和5年10月、制定。