

核融合原型炉における
超伝導 PF コイル及び CS コイルの
概念設計及び解析作業
仕様書

令和6年10月

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所
核融合炉システム研究開発部
核融合炉システム研究グループ

1.1 件名

核融合原型炉における超伝導 PF コイル及び CS コイルの概念設計及び解析作業

1.2 目的及び概要

核融合において、トロイダル磁場(TF)コイル、中心ソレノイド(CS)コイル、ポロイダル磁場(PF)コイルから成る超伝導コイルシステムは炉心プラズマ性能に直結する機器であるだけでなく、建設コストが高い機器の1つである。国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(以下「量研」という。)にて検討している原型炉超伝導コイルシステムは、ITER の超伝導コイルより経験磁場も増加し大型化することから、ITER コイル仕様をベースとしつつ電磁力等の観点から成立性を確認し、概念設計を固める必要がある。

本件は、原型炉用 PF コイルの概念設計を進めるため、PF コイル構造や導体の概念設計を実施するとともに、原型炉用 CS コイル導体の安定性解析、構造解析を実施することにより、原型炉用超伝導コイルシステムの概念設計に資するものである。

1.3 作業項目(詳細は 2. 技術仕様参照)

(1) 原型炉 PF コイルの概念設計

(1)-1 原型炉 PF コイル構造及び導体の概念設計

(2) 原型炉 CS コイルの概念設計

(2)-1 原型炉 CS コイル導体の超伝導安定性解析

(2)-2 原型炉 CS コイル構造解析

(3) 報告書作成

1.4 提出書類

受注者は、次表に定める書類を提出すること。

書類	提出時期	部数
打合せ議事録	打合せ後速やかに	1部
報告書	納入時	1部
電子データ(報告書)	納入時	1式

1.5 納入場所

量研

六ヶ所フュージョンエネルギー研究所 管理研究棟

核融合炉システム研究開発部 核融合炉システム研究グループ 217号室

1.6 納期

令和7年2月28日

1.7 貸与品

受注者は、本作業に当たり必要な量研が所有するこれまでの成果報告書を閲覧することができる。

1.8 検査条件

第1.4項に示す提出書類の確認及び報告書が本仕様書に定める技術仕様を満足することを確認し、検査合格とする。

1.9 知的財産権等

(1) 知的財産権の取扱い

本契約に関して発生する知的財産権の取扱いについては、別紙1「BA協定の調達に係る情報及び知的財産に関する特約条項」に定められたとおりとする。

(2) 技術情報の開示制限

受注者は、本契約を実施することによって得た技術情報を第三者に開示しようとするときは、あらかじめ書面による量研の承認を得なければならないものとする。量研が本契約に関し、その目的を達成するため受注者の保有する技術情報を了知する必要がある場合は、量研と受注者協議の上、決定するものとする。

(3) 成果の公開

受注者は、本契約に基づく業務の内容及び成果について、発表若しくは公開し、又は特定の第三者に提供しようとするときは、あらかじめ書面による量研の承認を得なければならないものとする。

1.10 機密の保持

本契約において作成され、又は量研から貸与された資料は契約目的以外に使用し

てはならない。ただし、事前に量研の承諾を得た場合にはこの限りではない。

1.11 打合せ

作業の進行状況に応じて、量研担当者と適宜打合せを持つものとする。また、原型炉設計及び主要系統設備設計検討作業の円滑な実施のため、受注者は量研が適宜開催する原型炉設計に係る作業連絡会及び報告会に参加するものとする（ウェブ会議システムによる参加も可）。

1.12 グリーン購入法の推進

- (1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達法の推進等に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。
- (2) 本仕様で定める提出書類（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

1.13 協議

本仕様書に記載されている事項及び本仕様書に記載のない事項について疑義が生じた場合は、量研と協議の上、その決定に従うものとする。

2. 技術仕様

2.1 作業の概要

本件では、原型炉用 PF コイルの概念設計を進めるため、PF コイル構造や導体の概念設計を実施するとともに、原型炉用 CS コイル導体の安定性解析、構造解析を実施し、これらを報告書にまとめる。

2.2 作業項目

2.2.0 検討対象炉型

本検討において対象にする炉型の主パラメータを表 1 に、核融合原型炉における超伝導コイルシステム概念図を図 1 に示す。核融合原型炉の超伝導コイルシステムは、TF コイル、CS コイル、PF コイルから構成される。

表 1. 核融合原型炉の主パラメータ

パラメータ	値
プラズマ大半径	8.5m
プラズマ小半径 (: アスペクト比)	2.43m (:3.5)
楕円度	1.75
核融合出力	1.5~2.0GW
トロイダル磁場	6.0T
プラズマ電流	13.5MA

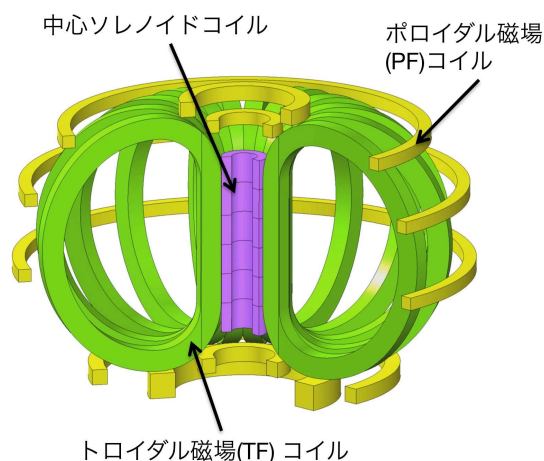


図 1. 核融合原型炉における超伝導コイルシステム概念図

2.2.1 原型炉 PF コイルの概念設計

トカマク型原型炉において、PF コイルはプラズマの形状・位置制御という重要

な機能を担う。現在の原型炉概念では、基本的な仕様として ITER-PF コイルを踏襲し、代表的な設計パラメータは以下のようになっている。

- ・超伝導線材：NbTi (#6PF コイルは Nb₃Sn を使用)
- ・運転温度：4.5K
- ・導体電流値：~40kA
- ・導体：ケーブルインコンジット導体
- ・PF コイル本数：7

図 2 に現在の PF コイルを含む超伝導コイルの配置図を示す。また、表 2 に各 PF コイルのプラズマ平衡時の PF コイル電流値を示す。#6 は ITER-PF コイルと比較しても経験磁場が大きくなることから超伝導線材として Nb₃Sn を使用する必要性があり、#7 も同様の可能性がある。本項では、これらの基本仕様を踏まえ、#6 と#7 の PF コイル 2 本に対し、以下の設計検討を行うことにより、PF コイル概念設計に資する。なお、各 PF コイルの電流値及び位置の詳細情報は別途、量研より提示するものとする。

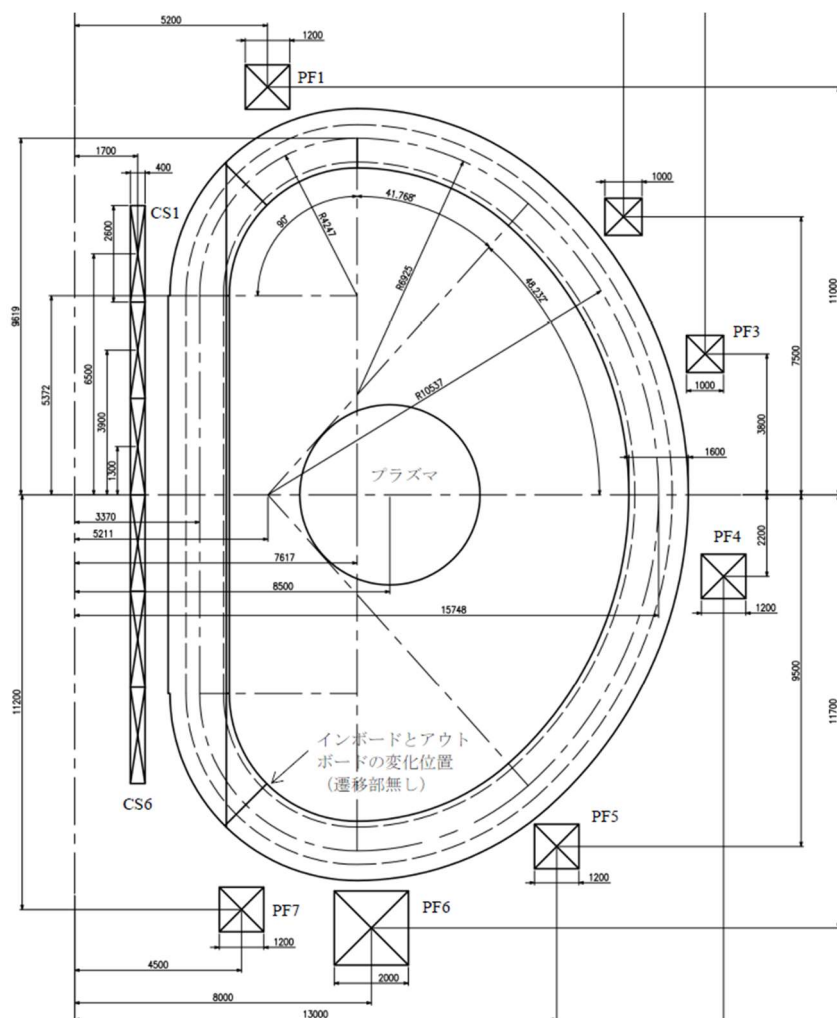


図 2. PF コイル配置の概念図

表 2. PF コイル主要諸元表

	I [MA]
#1	8.7
#2	-9.0
#3	3.9
#4	-12.2
#5	-8.6
#6	20.3
#7	12.6

(1) 原型炉 PF コイル構造及び導体の概念設計

表 2 に示す PF コイルの要求仕様に基づき、PF コイル断面構造を設計検討する。

検討に際し、ITER-PF コイルの断面構造を参照しつつ、同 PF コイルによる磁場分布及び電磁力を評価する。

また、構造概念に基づき、PFコイルの導体構造検討として、導体寸法やパンケーキ数、ターン数ならびに撚線構造の検討を行うとともに、その性能評価として、ボイド率や制限電流、臨界電流、温度マージン、ホットスポット温度の評価を実施する。

2.2.2 原型炉 CS コイルの概念設計

トカマク型原型炉において、CS コイルはプラズマの形状・位置制御という機能に加え、磁束供給、すなわちプラズマ電流の誘導という重要な機能を担う。現在の原型炉概念では、基本的な仕様として ITER-CS コイルを踏襲し、代表的な設計パラメータは以下のようになっている。

- ・超伝導線材： Nb_3Sn
- ・最大磁場：13T (両極性)、0.4 MA/s
- ・運転温度：4.5K
- ・導体電流値：~40kA
- ・導体：ケーブルインコンジット導体
- ・ユニット数：6
- ・コイル電流値：~10 MAT (磁場平衡により決定)

CS コイル外半径は要求供給磁束より決定されることになり、この CS コイル外半径が炉寸法、ラジアルビルドを決定する第一パラメータとなる。図3に現行の原型炉 CS コイルの寸法概略図を示す。本項では、これらの基本仕様を踏まえ、以下の(1)、(2)の設計検討を行うことにより、CS コイル概念設計に資する。

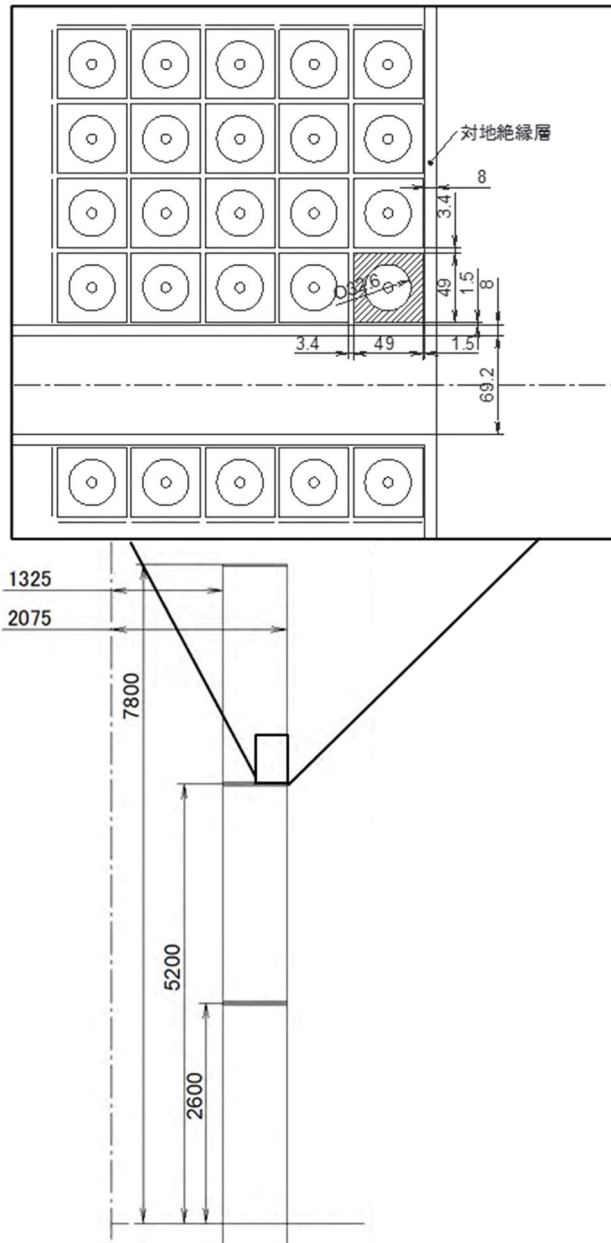


図 3. CS コイルの寸法概略図

(1) 原型炉 CS コイル導体の超伝導安定性解析

これまでの CS コイル導体の安定性解析では、超伝導素線と銅線を熱的に分離したクエンチ解析により、銅比が導体の安定性に与える影響を評価してきたが、合わせて電流転流時の発熱の影響を考慮する必要があることもわかっている。そのため本項では、超伝導素線と銅線間の電気抵抗を考慮した評価モデルを用い、CS コイル通電時に擾乱を与えた場合のクエンチ解析を行うことにより最小クエンチエネ

ルギーを求め、CS コイルの安定性を評価する。

(2) 原型炉 CS コイル構造解析

CS コイルの要求仕様ならびに図 3 に示す寸法の CS コイルを初期形状として電磁構造解析を 1 ケース実施する。得られた解析結果から強度的な改善を図り、2 ケース目として対策構造の構造解析を実施する。電磁構造解析は有限要素法による電磁場解析とし、プラズマ運転時の CS コイルにかかる電磁力を評価する。CS コイルモデルに対して電磁構造解析用モデルを作成し、ANSYS にて電磁構造解析を実施する。各超伝導コイル(CS、PF コイル)の電流値は量研より提示するものとする。上記で得られた電磁力分布をもとに CS コイルにおいて主たる応力が発生する 2 次元断面詳細構造解析を実施する。

各構造物のヤング率等の物性値は量研側より提示する。電磁構造解析は汎用解析コード ANSYS を用いることとし、解析モデル及び解析結果一式は ANSYS ファイルとして報告書と共に提出すること。その他、応力評価位置などの条件の詳細については別途量研の担当者と相談の上決定するものとする。

2.2.3 報告書の作成

2.2.1~2.2.2で実施した検討、解析（条件、結果を含む。）について報告書にまとめること。

以上

BA 協定の調達に係る情報及び知的財産に関する特約条項

本契約については、本契約一般条項によるほか、次の特約条項（以下「本特約条項」という。）による。

（定義）

第 1 条 本契約において「知的財産権」とは、次の各号に掲げるものをいう。

- （1） 特許法（昭和 34 年法律第 121 号）に規定する特許権又は特許を受ける権利
- （2） 実用新案法（昭和 34 年法律第 123 号）に規定する実用新案権又は実用新案登録を受ける権利
- （3） 意匠法（昭和 34 年法律第 125 号）に規定する意匠権又は意匠登録を受ける権利
- （4） 商標法（昭和 34 年法律第 127 号）に規定する商標権又は商標登録を受ける権利
- （5） 半導体集積回路の回路配置に関する法律（昭和 60 年法律第 43 号）に規定する回路配置利用権又は回路配置利用権の設定の登録を受ける権利
- （6） 種苗法（平成 10 年法律第 83 号）に規定する育成者権又は品種登録を受ける地位
- （7） 著作権法（昭和 45 年法律第 48 号）に規定するプログラムの著作物及びデータベースの著作物の著作権
- （8） 外国における、第 1 号から第 7 号に記載の各知的財産権に相当する権利
- （9） 不正競争防止法（平成 5 年法律第 47 号）に規定する営業秘密に関して法令により定められた権利又は法律上保護される利益に係る権利（以下「営業秘密」という。）

2 本契約において「情報」とは、法律による保護を受けることができるか否かを問わず、図面、意匠、計算書、報告書その他の文書、研究開発に関する記録された資料又は方法並びに発明及び発見に関する説明であって、前項に定義する知的財産権を除いたものをいう。

3 本契約において「発明等」とは、特許権の対象となるものについては発明、実用新案権の対象となるものについては考案、意匠権、商標権、回路配置利用権及びプログラム等の著作権の対象となるものについては創作、育成者権の対象となるものについては育成並びに営業秘密を使用する権利の対象となるものについては案出をいう。

4 本契約において「背景的な知的財産権」とは、本契約の締結前に取得され、開発され、若しくは創出された知的財産権又は本契約の範囲外において取得され、開発され、若しくは創出される知的財産権をいう。

5 本契約において「生み出された知的財産権」とは、本契約の履行の過程で、乙が単独で又は甲と共同で取得し、開発し、又は創出した知的財産権をいう。

6 本契約において「BA 協定」とは「核融合エネルギーの研究分野におけるより広範な取組を通じた活動の共同による実施に関する日本国政府と欧州原子力共同体との間の協定」をいう。

7 本契約において「事業長」とは、BA 協定第 6 条に定める「事業長」をいう。

- 8 本契約において「事業チーム」とは、BA 協定第6条に定める「事業チーム」をいう。
- 9 本契約において「締約者」とは、BA 協定の締約者をいう。
- 10 本契約において「実施機関」とは、BA 協定第7条に基づき、締約者が指定する法人をいう。
- 11 本契約において「団体」とは、実施機関がBA 協定の目的のために物品又は役務の提供に関する契約を締結する団体をいう。
- 12 本契約において「特許等」とは、特許、登録実用新案、登録意匠、登録商標、登録回路配置及び登録品種の総称をいう。

(情報の普及及び使用)

- 第2条 乙は、実施機関又は締約者が、本契約の実施により直接に生ずる科学的及び技術的な雑誌の記事、報告書及び書籍を翻訳し、複製し、及び公に頒布するための非排他的な、取消し不能な、かつ、無償の利用権をすべての国において有することに同意する。
- 2 乙は、前項により作成される著作権のある著作物の写しであって公に頒布されるすべてのものには、著作者が明示的に記名を拒否しない限り、著作者の氏名を明示することに同意する。
- 3 乙は、本契約の実施により乙が生み出すすべての情報を平和的目的のためのエネルギー源としての核融合の研究開発における利用のため、締約者、実施機関、事業長及び事業チームの構成員が自由に入手できることに同意する。

(発明等の報告)

- 第3条 乙は、本契約の履行の過程で発明等を創出した場合には(以下、かかる発明等を「本発明等」という。)、本発明等の詳細とともに、速やかに甲に書面により報告するものとする。
- 2 乙は、甲が前項の本発明等の詳細を含む報告を締約者、甲以外の実施機関、事業長及び事業チームの構成員に提供すること、並びに、甲が自ら実施する核融合の研究開発に関する活動のため必要とする場合において乙以外の団体に提供することに、あらかじめ同意する。

(生み出された知的財産権の帰属等)

- 第4条 本発明等に係る知的財産権は、乙に帰属する。ただし、本発明等が甲乙共同で創出したものである場合、当該本発明等に係る知的財産権は甲及び乙の共有となる。
- 2 前項ただし書きの甲及び乙の共有に係る知的財産権について、甲及び乙は、知的財産権の持分、費用分担、その他必要な事項を協議の上、別途取決めを締結するものとする。
- 3 乙は、甲及び乙の共有に係る当該知的財産権を自ら又は乙が指定する者が実施する場合、甲及び乙の持分に応じてあらかじめ定める不実施補償料を甲に支払うものとする。

(発明等の取扱い)

第5条 乙は、本発明等に関し、(i)特許等の登録に必要な手続を行うか、(ii)営業秘密として管理するか、又は、(iii)(i)若しくは(ii)のいずれも行わないかという取扱いについて速やかに決定の上、甲に決定内容を書面により報告する。ただし、当該本発明等が甲乙共同で創出したものである場合、甲及び乙は、上記(i)ないし(iii)の取扱いについて別途協議の上決定する。

2 乙は、前項に基づく本発明等の取扱いに関する決定内容について、甲が締約者、甲以外の実施機関、事業長及び事業チームの構成員並びに甲が自ら実施する核融合の研究開発に関する活動のため必要とする場合において乙以外の団体に提供することに、あらかじめ同意する。

3 乙は、乙が第1項の(iii)の取扱いをすることを決定した本発明等については、締約者又は実施機関の求めがあった場合は、当該本発明等の知的財産権を締約者又は実施機関に承継させるものとする。

(背景的な知的財産権の認定)

第6条 乙が本契約の履行の過程で利用する背景的な知的財産権は、甲及び乙が別途締結する覚書(以下「覚書」という。)に定める。覚書に定めのない知的財産権であって、本契約の履行の過程で利用されるものは、生み出された知的財産権とみなす。

2 乙は、覚書に定める知的財産権の内容に変更が生じたときは、速やかに当該変更内容を甲に書面により報告するものとする。

3 乙は、本契約締結後に本契約の履行の過程で利用すべき背景的な知的財産権の存在が判明したときは、速やかに、当該背景的な知的財産権が、本契約の範囲外において存在することを証明する具体的な証拠とともに、本契約締結前に報告できなかった正当な理由を甲に書面により報告するものとする。

4 甲は、前項の報告を受けた場合は、乙から提出された証拠及び理由の妥当性を検討の上、必要に応じて、甲乙協議の上、覚書の改訂を行うものとする。

5 乙は、本条に基づく報告について、甲が締約者、甲以外の実施機関、事業長及び事業チームの構成員に提供すること、並びに甲が自ら実施する核融合の研究開発に関する活動のため必要とする場合において乙以外の団体に提供することに、あらかじめ同意する。

6 覚書による背景的な知的財産権の認定は、当該背景的な知的財産権について、締約者、実施機関、事業長及び事業チームの構成員又は乙以外の団体に実施権等を付与する義務を生じさせるものではない。

(背景的な知的財産権の帰属)

第7条 本契約は、背景的な知的財産権の帰属について何ら変更を生じさせるものではない。

(創出者への補償等)

第8条 乙は、乙の従業者又は役員(以下「従業者等」という。)が創出した本発明等

に係る知的財産権を、適用法令に従い、乙の費用と責任において従業者等から承継するものとする。

(生み出された知的財産権の実施許諾)

第9条 生み出された知的財産権の実施権の許諾（利用権の付与を含む。以下同じ。）については、次の各号による。

(1) 乙は、甲が自ら実施する研究開発に関する活動のため、並びに事業長及び事業チームの構成員が事業チームに与えられる任務の遂行のため、平等及び無差別の原則に基づき、当該生み出された知的財産権の取消し不能な、非排他的な、かつ、無償の実施権を甲に許諾する。当該実施権は、甲が第三者に再実施を許諾する権利を伴う。

(2) 乙は、平和的目的のためのエネルギー源としての核融合の研究開発のため、平等及び無差別の原則に基づき、当該生み出された知的財産権の取消し不能な、非排他的な、かつ、無償の実施権を実施機関及び締約者に許諾する。当該実施権は、実施機関及び締約者が第三者に再実施を許諾する権利を伴う。

なお、乙は、当該生み出された知的財産権が実施機関又は締約者によってイーター計画に使用される場合は、当該生み出された知的財産権の実施権がイーター事業の共同による実施のためのイーター国際核融合エネルギー機構の設立に関する協定に規定される背景的な知的財産権として取り扱われることに、あらかじめ合意する。

2 前項の知的財産権が甲と乙の共有に係るものである場合、甲と乙は、共同して同項に基づく実施権の許諾を行う。

3 乙は、第1項に規定する実施権及び再実施を許諾する権利の許諾の記録を保持し、甲の求めに応じこれを甲に提供する。乙は、上記記録に変更がある場合は、各年の上半期については7月15日までに、下半期については翌年の1月15日までに甲に報告書を提出する。

4 乙は、前項の規定に従い甲に提供した記録を、締約者、甲以外の実施機関、事業長及び事業チームの構成員に提供すること、並びに甲が自ら実施する核融合の研究開発に関する活動のため必要とされる場合において乙以外の団体に提供することに、あらかじめ同意する。

5 乙は、締約者、実施機関以外の第三者に対し、生み出された知的財産権の実施権を許諾する場合には、甲の事前の書面による同意を得て行うものとする。当該第三者への実施権の許諾は、平和的目的のための使用に限り行うものとする。

6 乙は、締約者又は甲以外の実施機関に対して直接実施許諾できない理由があるときには、甲が第1項第2号に基づき締約者又は甲以外の実施機関に再実施を許諾するための権利を伴う、生み出された知的財産権の取消し不能な、非排他的な、かつ、無償の実施権を甲に許諾するものとする。

(知的財産権の帰属の例外)

第10条 乙は、本契約の目的として作成される提出書類、プログラム及びデータベース等の納入品に係る著作権は、すべて甲に帰属することを認め、乙が著作権を有する

場合（第6条に基づき従業者等から承継する場合を含む。）であっても、乙はかかる著作権（著作権法第21条から第28条までに定める全ての権利を含み、日本国内における権利に限らない。）を甲に譲渡する。かかる譲渡の対価は、本契約書に定める請負の対価に含まれる。

2 前項の規定により著作権を乙から甲に譲渡する場合において、当該著作物を乙が自ら創作したときは、乙は、著作者人格権を行使しないものとし、当該著作物を乙以外の第三者が創作したときは、乙は、当該第三者に著作者人格権を行使しないように必要な措置を講じるものとする。

（下請負人に対する責任）

第11条 乙は、本契約一般条項の規定に従い、下請負人に対し本契約の一部を履行させる場合、本特約条項に基づく乙の一切の義務を乙の責任において当該下請負人者に遵守させるものとする。

（有効期間）

第12条 本契約一般条項の定めにかかわらず、本特約条項の定めは BA 協定の終了後も効力を有する。

（言語）

第13条 本特約条項に定める乙から甲への書面による報告は、和文だけでなく、英文でも提出することとし、両文書は等しく正文とする。

（疑義）

第14条 本特約条項の解釈又は適用に関して疑義が生じた場合、BA 協定の規定が本特約条項に優先する。