プラズマ焼結のシミュレーションと型の製作
仕様書

令和8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
ブランケット研究開発部
ブランケット工学研究グループ

1. 一般仕様

1.1 件名

プラズマ焼結のシミュレーションと型の製作

1.2 目的

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下「QST」という。）では、発電用ブランケットの開発のため、各種材料分析装置の整備に加えて、大面積熱負荷試験施設の増強、安全実証試験装置の増強や、強磁場環境下での性能試験に向けた技術開発を進めている。原型炉に向けて、発電ブランケット用熱負荷試験装置の詳細設計を実施しており、その中で、先進増殖機能材料に関する様々な研究・開発は、発電ブランケットの実機環境を理解する上で重要である。

先進ブランケットの一つとして、先進中性子増倍材料をブロック（ベリライドブロック）を装荷する設計案が提案されており、QST では、ベリライドブロックの製作方法について、プラズマ焼結法により製作を検討している。

実機サイズへの大型化に当たっては、焼結体の温度分布の不均一性を事前に把握し、スケールアップ技術及び製作工程を確立する必要がある。そのため、本件では、通電時の電流条件等に起因する型及び材料内部の温度分布をシミュレーションにより確認し、得られた結果に基づき、ベリライドブロックの製作に必要な黒鉛製焼結型を設計・製作するものである。

1.3 納入物

（1）第 2.1 項に示すシミュレーション結果を示す報告書
（2）第 2.2 項に示す黒鉛製焼結型の設計及び製作
（3）その他、QSTが求める書類の提出

1.4 支給品及び貸与品

下記について無償で QST より支給又は貸与を行う。
・本作業の実施に際して、QST からの支給又は貸与が必要と認められる物品、関連データ、図面等

※標記の件を実施するにあたり、その他、必要な情報がある場合、QST に要請すること。

1.5 提出図書

表 1 に示す図書を指定時期に指定部数、第 1.7 項の納入場所に納入すること。
提出図書は指定部数の冊子体の他に電子版を提出すること。表 1 に示す図書及び最終的に採用した設計データファイルを格納した電子媒体も提出すること。電子版のファイル形式は QST と協議の上、決定するものとする。

表 1 提出図書

No.	図書名称	印刷物提出部数	提出時期	確認
1	作業要領書	1	契約後速やかに	要
2	シミュレーション結果報告書	1	作業完了後速やかに	要
3	焼結型設計図面	1	作業完了後速やかに	要
4	打合せ議事録	1	打合せ後 2 週間以内	要
5	情報管理要領書	1	作成完了後速やかに	不要
6	質問書	1	協議すべき技術課題が生じた場合直ちに	不要

※ 表 1 に示す図書を指定された時期に指定部数を納入すること。

※ 要確認図書の確認方法は以下とする。

・要確認図書は、提出後に QST が内容を確認する。修正の指示があった場合は、受注者が速やかに修正して再提出し、QST の確認を受けること。QST の確認は、受注者の責任を免除するものではない。

1.6 納期

令和9年3月5日

1.7 納入場所

青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字表舘 2 番地 166
QST 六ヶ所フュージョンエネルギー研究所 ブランケット工学試験棟 棟内指定場所

1.8 検査条件

第 1.7 項に示す納入場所に納入後、納入物の員数検査、外観検査の合格及び第 1.5 項に示す提出図書の確認並びに技術仕様書の確認をもって検査合格とする。

1.9 技術情報及び成果公開等の取り扱い

受注者は、本業務の実施に当たり、知り得た情報を厳重に管理し、本業務遂行以外の目的で、受注者及び下請会社等の作業員を除く第三者への開示、提供を行ってはならない。このため、機密保持を確実に行える具体的な情報管理要領書を作成・提出し、これを厳格に遵守すること。

QST は、本業務によって得られた成果について、科学技術の発展および社会還元に資するため、原則として学会発表、論文投稿、報道発表等により広く一般に公開できるものとする。

1.10 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）提出図書（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。

1.11 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、QSTと協議の上、その決定に従うものとする。

2. 技術仕様

2.1 シミュレーション

(1) シミュレーションの目的

本シミュレーションは、プラズマ焼結（通電加圧焼結）法により実機サイズのベリライドブロックを製作するにあたり、焼結体の大型化に伴う温度分布の不均一性を事前に把握し、実材料の製作に必要な黒鉛製焼結型の形状・寸法を決定するための設計根拠を得ることを目的とする。得られた結果は、第 2.2 項に示す黒鉛製焼結型の設計及び製作に反映する。

(2) 対象材料及び用語の定義

・先進中性子増倍材料：核融合炉の発電ブランケットにおいて、中性子を増倍しトリチウムの生産効率を高める材料であり、従来のベリリウム金属に比べ高温での安定性等に優れるベリリウム金属間化合物（ベリライド、$Be_{12}Ti$）を指す。本件では、$Be_{12}Ti$ を対象とする。

※$Be_{12}Ti$ のデータは少ないため、その他、金属間化合物の代替材でのシミュレーションが必要な場合は、QST と協議する。

・プラズマ焼結：黒鉛製の型に充填した粉末に、型を介してパルス状の大電流を通電し、ジュール発熱により加熱しつつ加圧して焼結する方法をいう。

・プラズマ焼結挙動（温度）：通電時の電流条件等に起因して、焼結中の型及び材料内部に生じる温度分布並びにその時間変化（昇温過程、保持過程及び冷却過程）をいう。

(3) シミュレーションの内容

円筒形の黒鉛製焼結型を用いたプラズマ焼結について、チャンバー内の輻射熱及び指定材料の物性を考慮し、通電時の型及び材料内部の温度分布を解析する。まず全ケース共通のシミュレーション用基本モデルを作製し、これに基づき以下の 3 ケースについて解析を実施する。（モデルは、基本モデルをもとに型及び試料寸法のみを変更した 3 パターンとする。）

- 目標焼結体の温度：1200℃
- 目標焼結圧力：約 54 MPa
- ケース 1：ϕ105 mm × t10 ～ 20 mm 黒鉛製焼結型の焼結温度
- ケース 2：200 mm × 300 mm × t40 ～ 50 mm 黒鉛製焼結型の焼結温度
- ケース 3：200 mm × 300 mm × t80 ～ 100 mm 黒鉛製焼結型の焼結温度

※各ケースにおいて、試料厚さの範囲（t の下限値及び上限値）の両条件について解析を行い、厚さの違いが温度分布に及ぼす影響を示すこと。

※焼結温度のシミュレーションの際に、必要に応じて保温材（黒鉛フェルト等）の適用すること。必要に応じて、QST と協議する。

※メッシュサイズは 20mm 以下とし、要素の次数は 2 次要素(精度重視)とすること。

※焼結条件（昇温速度、保持時間、冷却条件、通電条件等）は、目標焼結温度（1200℃）及び目標焼結圧力（約 54 MPa）を基準とし、QST が打合せにより提示する。提示のない事項は、QST と協議の上で設定すること。

(4) 入力条件

解析に必要な条件は、下記の通りである。記載のない事項は、QST と協議の上で設定すること。

- 電極の寸法はφ400 mm とする。スペーサに図面はないため、型、パンチ及びスペーサの形状・寸法は、QST が示す条件（電極寸法、目標焼結温度及び目標焼結圧力等）を基に受注者が初期案を設定し、QST の確認を受けること。
- 各部材の物性値（熱伝導率、電気抵抗率、比熱、密度、放射率等）。物性値の出典を明記すること。
- 通電条件（電流値、パルスパターン等）、加熱パターン（目標温度、保持時間等）及び加圧条件
- チャンバー内の境界条件（輻射、雰囲気、冷却条件等）
- Be12Ti に関する情報として、
  - 熱伝導特性に関する情報として、QST が保有する測定データ（焼結条件：1200℃、約 54 MPa、20 min)を参考にすること。[1]

温度（℃）	25	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
λ（W/mK）	≒ 46.93[*]	45.70	43.51	42.56	41.74	41.56	41.63	42.03	42.21	42.63	42.74	42.96

  - 密度に関しては、文献値である約 2.288 g/cm^3[2]を参照とする。
- 電気伝導率は、QST が提供する熱伝導特性から Wiedemann-Franz 式により算出するか、又は類似の代替材料である Ti-38wt%Al の文献値を利用すること。いずれを用いるかは、QST と協議の上で決定する。

参考文献

[1] Hwang et al., 2025; Uchida et al., 2003

[2] G.V. Samsonov, I.M., Handbook of Refractory compounds, Ifi/Plenum, New York, 1980.

[*] 装置の限界により、測定値ではなく、参考値

(5) 出力（解析結果）

- 各ケースにおける型及び試料内部の温度分布図（代表時刻）
- 代表点の温度の時間変化（試料中心部、試料外周部、型外表面、温度計測位置相当点等）
- 試料内の最大温度差及び温度均一性の評価（保持過程における試料内の最高温度と最低温度の差を、各ケース・各試料厚さについて示すこと。判定基準値を設ける場合は、QST が打合せで提示する。）
- 上記結果に基づく黒鉛製焼結型の形状・寸法に関する提案（第 2.2 項の設計への反映事項）

(6) 実施上の注意事項

- 解析ソフトウェアは特定の製品に限定しない。電流・熱の連成解析が可能であり、第 2.1 項(5)に示す出力が得られるものであれば、市販ソフトウェア、自社開発ソフトウェアのいずれも使

用可とする。ただし、ソフトウェアの名称、バージョン及び本解析への適用実績又は検証方法を作業要領書に記載すること。

- 解析手法（電流・熱の連成解析等）、使用ソフトウェア（名称及びバージョン）、モデルの仮定、メッシュ分割及び境界条件の設定根拠を、作業要領書に記載して事前に QST の確認を受けること。
- 解析の妥当性（メッシュ依存性、物性値の温度依存性の扱い等）を確認し、その方法と結果を報告書に記載すること。
- 解析に用いた条件及び仮定は、結果と対応付けて報告書に明記すること。
- 解析モデルのデータ及び解析結果のデータを電子媒体で提出すること。
- QST から貸与した図面及びデータは、本作業の目的以外に使用しないこと。

(7) QST による確認

シミュレーション結果は、QST が確認する。作業の進め方は次のとおりとする。

- 解析モデル及び解析条件が確定した時点で、打合せにより QST の確認を受けること。
- 全ケースの解析完了後、結果を報告し、QST の確認を受けること。結果に疑義又は追加検討の要請がある場合は、QST と協議の上、対応すること。
- QST が結果を承認した後、第 2.2 項の黒鉛製焼結型の設計及び製作に着手すること。

2.2 黒鉛製焼結型の製作

第 2.1 項のシミュレーション結果に基づき、以下の黒鉛製焼結型の設計及び製作を行う。

(1) 製作物及び数量

- ϕ105 × t10 ～ 20 mm 用黒鉛製焼結型 1 個
- 200 × 300 × t40 ～ 50 mm 用黒鉛製焼結型 1 個

上記は各 1 個とし、合計 2 個を納入すること。なお、第 2.1 項のケース 3（200 × 300 × t80 ～ 100 mm）はシミュレーションのみを対象とし、型の製作は含まない。焼結型は型本体のほか、シミュレーションで想定した上下パンチ等、プラズマ焼結に必要な構成部品一式を含むものとする。

(2) 材質

- 主要構成部品の材質は黒鉛とする。黒鉛の種類（グレード）、密度、強度、熱伝導率及び電気抵抗率等の物性は、シミュレーションで用いた値と整合するものを選定し、材料の仕様書及び検査成績書等を提出すること。
- 黒鉛材の選定結果は、設計段階で QST の確認を受けること。

(3) 設計

- シミュレーション結果に基づき、型の形状・寸法（内径、外径、高さ、肉厚、パンチ形状、温度計測用の穴の位置等）を設計し、設計図面を作成して QST の確認を受けること。
- 型は、QST が保有するプラズマ焼結装置のチャンバー、電極及び加圧機構に取り付けて使用できる寸法・形状とすること。装置の仕様（チャンバー内寸法、電極及び加圧機構の形状・寸法、最大電流、最大加圧力等）は、入札説明時に QST が参加者全員に開示する。

・ 加熱、加圧時の強度及び試料の離型性（取り外しやすさ）を考慮した設計とすること。

(4) 製作

・ QST が確認した設計図面に基づき製作すること。製作中に設計変更が必要となった場合は、事前に QST と協議し、承認を得ること。
・ 加工寸法、公差、表面粗さ等は、受注者が設計図面に明記し、QST の確認を受けること。図面に指示のない事項は、QST と協議の上、決定すること。
・ 加工時の割れ、欠け及び汚れが生じないよう適切に取り扱い、清浄な状態で納入すること。

(5) 検査及び納入

・ 製作後、寸法検査及び外観検査を実施し、結果を記録すること。
・ 割れ、欠け等が生じないよう、梱包して納入すること。
・ 納入物は、第 1.7 項の納入場所に納入すること。

2.3 実施条件及び協議事項

(1) 実施条件

・ 第 2.1 項のシミュレーションはチャンバー内部の輻射熱と指定材料で実施する。
・ チャンバー内の境界条件は、黒鉛製型からの輻射を考慮すること。また、焼結試料は指定材料を用いた解析とすること。
・ 本作業は、契約締結後、第 1.6 項の納期までの限られた期間で実施する。受注者は、シミュレーション、QST の確認、型の設計及び製作の各工程を考慮した工程表を作業要領書に記載し、QST の確認を受けること。
・ QST と打合せを行う場合は、打合せ議事録を作成して提出すること（表 1 参照）。打合せは、原則として Web 会議等でも実施できるものとする。

(2) 協議事項

・ 本仕様書に記載のない事項、又は記載内容に疑義がある場合は、作業を進める前にQSTと協議し、その決定に従うこと。
・ 黒鉛のグレードに関しては、設計するパンチとダイの肉厚に依存するため、受注者の意見がない場合、高強度黒鉛のグレードを想定する。
・ その他、協議事項については、QST と協議の後決定する。

(3) その他

・ 納入後、受注者の責任による不具合が判明した場合は、受注者の負担により速やかに修正又は再製作を行うこと。
・ 本作業で知り得た情報及び QST から貸与された資料は、情報管理要領書に基づき適切に管理し、本作業以外の目的に使用しないこと。
・ 本作業の全部又は一部を第三者に再委託する場合は、事前に QST の承認を得ること。

（要求者）

部課室名：ブランケット研究開発部　増殖機能材料開発グループ

氏名　　：黄　泰現

以上