

熱負荷試験装置及び試験体設計のための
解析評価手順の評価

仕様書

令和 8 年 8 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
核融合炉材料研究開発部
核融合炉構造材料開発グループ

1. 一般仕様

1.1. 件名

熱負荷試験装置及び試験体設計のための解析評価手順の評価

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。

ブランケットには、低放射化フェライト鋼(F82H)の表面をタングステン(W)により覆った複合構造を適用する案が立案されているが、本構造における懸念として、プラズマからの繰り返し熱負荷による母材のき裂進展と W-F82H 間界面における剥離がある。これら損傷の発生により、損傷周辺部に集中する応力の相互作用が発生し、破壊を加速させる恐れがある。ブランケット構造体の健全性を担保するためには、損傷・破壊現象に対し、複雑かつ重大な破壊現象の正確な予測法が望まれる。

破壊予測の正確性を保証するためには、熱負荷装置実験の結果と解析結果の整合性評価が不可欠である。特に試験体の破壊が生じ得る熱負荷条件や幾何的拘束条件(試験体の設置方法)の確認が望まれる。また、そのためには評価に適した試験体形状や装置構造を探索しつつ、繰り返し計算を行うことで最適条件を見出し、合理的な設計を行う必要がある。原型炉ブランケット用熱負荷試験装置の熱負荷条件や試験体形状や設置方法に関する設計検討を加速させるには、多様な入力条件に対応可能な、損傷・破壊現象を評価するための解析評価手順を構築することが不可欠である。

本件は、損傷の発生や成長及び破壊までの一連の過程や寿命評価を実行可能な機能を有する汎用有限要素法解析ソフト ABAQUS を使用して、熱負荷試験装置及び試験体設計のための解析評価手順の構築に向けた解析評価法の検討を行うものである。

1.3. 契約範囲

ブランケットにおいて想定される損傷・破壊現象を評価するための解析モデルを作成する上で必要となる評価法やその手順を記した書類を作成する。また、手順書にて記載した解析結果を参照するためのモデルも提出する。なお、計算モ

デルの題材としては、今後の設計活動に反映させるために、原型炉の設計方針を反映した構造を参照して、解析モデルを作成することとする。

1.4. 貸与品

解析モデルに反映する材料物性値

1.5. 納入物

- 1) 表1に示す図書を指定された時期に指定部数、1.7項の納入場所に納入すること。
- 2) 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解析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と受注者協議の上、決定するものとする。

表 1 提出図書

図書名称	印刷物 提出部数	提出時期	確認
再委託承諾願	1	契約後速やかに（下請がある場合のみ）	要
作業体制表(1.14 項参照)	1	契約後 2 週間以内及び更新の都度	要
作業要領書	1	契約後速やかに	要
工程表(1.14 項参照)	1	契約後 2 週間以内及び更新の都度	要
解析手順書*	1	作業完了時	要
打合せ議事録（1.15.2）	1	打合せ後 2 週間以内	要
質問書	1	協議すべき技術課題が生じた場合直ちに	不要

* 解析手順書に記載すべき項目は、第 2 章の技術仕様に示す。

※確認を要する図書の確認方法は以下のとおりとする。QST は、確認のために提出された図書を受領したときは、期限日を記載した受領印を押印して返却する。また、当該期限までに確認を完了し、受理しない場合には修正を指示する。修正等を指示せず受理する場合、その旨通知するか当該期限をもって受理したものとする。この確認は、確認が必要な図書 1 部をもって行うものとする。

1.6. 納期

令和9年2月15日

1.7. 納入場所

青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字表館 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 3F 事務室 1

1.8. 検査条件

作業完了後、表 1 に示す提出図書の完納・確認及び仕様書に定めるところに従って業務が実施されたと QST が認めたときをもって検査合格とする。

1.9. 機密の保持

本契約において作成され、又はQST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QSTの承諾を得た場合にはこの限りではない。

1.10. グリーン購入法の促進

- 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) 本仕様で定める提出図書(納入印刷物)については、グリーン購入法の基本方針で定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

1.11. 工程管理

- 1) 本件の履行に当たり、作業の工程表を作成する。提出図書の提出日及び確認までに必要な最大日数も記載すること。工程表のファイル形式は QST と受注者が協議の上、決定するものとする。工程表を変更する必要がある場合は、改訂版を提出し、QST の確認を得ること。工程の遅延が発生する可能性があるかと受注者が判断した場合は、直ちに QST に報告し、遅延を解消するための対策を提案すること。
- 2) 解析に関わる要員が満たすべき資格と力量を有していることが明記された作業体制表を作成し、QST の確認を得ること。

1.12. 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。

打合せの実施に当たっては、以下の要領に従うものとする。

- 1) QST と受注者は、常に緊密な連絡を保ち、本仕様書の解釈及び解析に万全を期すものとする。必要に応じ、オンライン会議、テレビ会議又は対面で打合せを行うものとする。
- 2) 打合せをした場合、打合せ後 2 週間以内に受注者は打合せ議事録を作成し、QST に提出する。確認の方法は、1.5 項に従うものとする。
- 3) アクションリストを作成し管理すること。打合せごとにアクションリストを更新すること。アクションリストは打合せ議事録と合わせて提出すること。
- 4) 打合せ議事録を含む技術的な連絡は文書（技術連絡シート）をもって行うものとする。
- 5) 受注者は QST からの質問事項に対しては速やかに回答すること。回答は書面によることを原則とし、急を要する場合については、あらかじめ口頭で了承を得て、1 週間以内に正式に書面を提出し、QST の確認を得ること。所定期日以内に回答書面の提出がない場合は、QST の解釈を優先する。

2. 技術仕様

2.1. 作業概要

ブラケット外殻構造物を題材として、汎用有限要素法解析ソフト ABAQUS CAE ver2026の陰解法を用いた下記の解析手順書の作成と評価結果の報告を行う。

- 伝熱解析
- W-F82H界面に適用したCZM解析と伝熱解析の連成解析
- W及びF82Hに適用したXFEM解析と伝熱解析の連成解析
- W及びF82HにXFEMをW-F82H界面にCZMを適用した解析と伝熱解析の連成解析
- 疲労解析と伝熱解析の連成解析
- クリープ解析と伝熱解析の連成解析

なお、CZMはCohesive Zone Modelの略称であり、界面の力学相互作用を反映して境界メッシュの分離を再現する計算手法である。XFEMはeXtended Finite Element Methodの略称であり、自動でメッシュ分割を行いながらき裂の発生と成長を再現する解析機能を表す。連成は弱連成・強連成いずれも可とする。

2.2. 作業内容

図 1 に示す、形状の解析モデルを作成する。なお、形状は 1/4 カットモデルとし、対称境界条件を適用すること。その後、次項以降記載のツールを使用する。なお、材料データの温度依存性は考慮するものとする。また解析に必要な材料データは QST が指定するものとする。ただし受注者は、ツールの動作確認を行う上で材料及び熱、形状等の境界条件の設定変更が必要な場合は、QST の担当者との了承を得て変更可能とする。本仕様書記載の計算条件にて、き裂が進展しなかった場合も同様に変更可能とする。

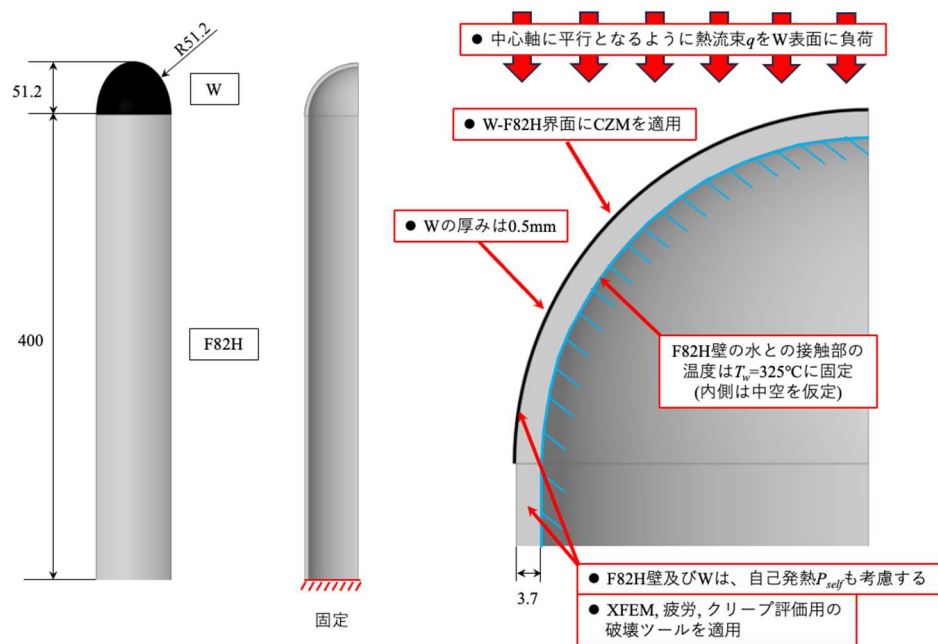


図1 解析モデルの形状及び境界条件

(a) 伝熱解析

図1に示す通り、長軸方向に平行となるようにW表面に熱流束 0.5 MW/m^2 と、W, F82Hの自己発熱(W: 1.66 MW/m^2 F82H: 1.66 MW/m^2)を考慮した伝熱解析モデルを作成し、実施すること。1サイクルの熱流束履歴は、図2を参考に設定すること。なおサイクル数は、(b)-(f)それぞれの解析に応じて同様の条件を計算すること。

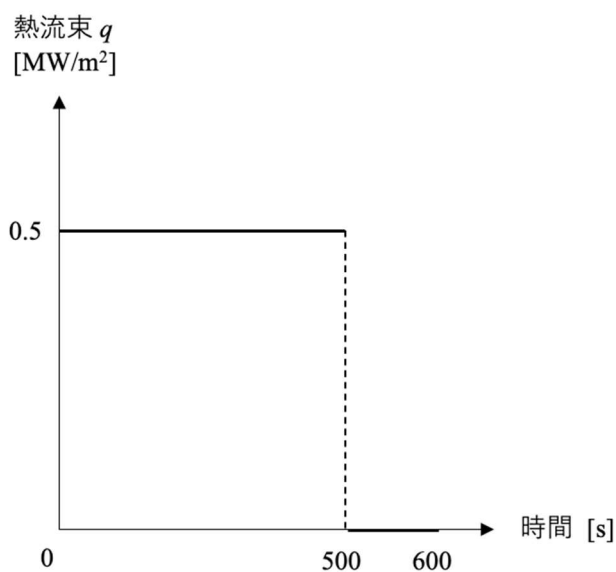


図2 W表面熱流束履歴(1サイクル)の例

(b) W-F82H界面に適用したCZM解析と伝熱解析との連成解析

(a)で作成した10サイクルの熱伝導解析と連成した構造解析モデルに対し、W-F82H界面にCZMを適用した解析を実施すること。移動硬化則も反映すること。また計算が実行できなかった場合は、手順書にその経緯を記載し、実行できたものについては手順を記載すること。

(c) W及びF82Hに適用したXFEM解析と伝熱解析との連成解析

(a)で作成した10サイクルの熱伝導解析と連成した構造解析モデルに対し、W及びF82HにXFEMを適用した解析を実施すること。移動硬化則も反映すること。また計算が実行できなかった場合は、手順書にその経緯を記載し、実行できたものについては手順を記載すること。

(d) XFEM及びCZMを適用した伝熱解析との連成解析

(a)で作成した 10 サイクルの熱伝導解析と連成した構造解析モデルに対し、W 及び F82H に XFEM を、W-F82H 界面に CZM を適用した解析を実施すること。移動硬化則も反映すること。また計算が実行できなかった場合は、手順書にその経緯を記載し、実行できたものについては手順を記載すること。

(e) 疲労解析と伝熱解析との連成解析

(b), (c)または(d)のき裂進展解析結果を考慮して、(a)で作成した 1000 サイクルの熱伝導解析と連成した構造解析モデルに対し、更に W 及び F82H にパリス則を適用した解析を実施すること。また移動硬化則も反映すること。なお、初期き裂の形状に関しては、QST と協議の上決定すること。計算が実行できなかった場合は、手順書にその経緯を記載し、実行できたものについては手順を記載すること。

(f) クリープ解析と伝熱解析との連成解析

(e)の解析モデル(1000 サイクル計 500000s)に対し、更に W 及び F82H にクリープツールを適用した解析を実施すること。移動硬化則も反映すること。計算が実行できなかった場合は、手順書にその経緯を記載し、実行できたものについては手順を記載すること。

2.3. 解析手順書

2.2 (a)から(f)に記載した解析の実施手順を記載した解析手順書を提出すること。解析手順書には、入力情報や要素モデルの作成方法、境界条件の設定方法について記載すること。また計算結果も添えること。また計算結果の根拠となる解析ファイル(入力及び出力ファイル)も提出すること。提出は電子媒体でも可とする。なお、形状モデル作成手順に関しては、ABAQUS/CAE を使用した方法と、CAD モデルをインポートした場合の 2 種類について記載すること。

以上