

平成 31 年度原子炉格納容器の局部破損解析手法の検討及び要素試験の解析に係る入札可能性調査実施要領

平成 31 年 4 月 26 日
原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門

原子力規制庁では、「平成 31 年度原子炉格納容器の局部破損解析手法の検討及び要素試験の解析」の受託者選定に当たって、一般競争入札（最低価格落札方式）に付することの可能性について、以下のとおり調査いたします。

つきましては、下記 1. 事業内容に記載する内容・条件において、的確な業務遂行が可能であり、かつ、当該業務の受託者を決定するに当たり一般競争入札を実施した場合、参加する意思を有する方は、2. 登録内容について、4. 提出先までご登録をお願いします。

1. 事業内容

1.1 概要

原子力規制庁（以下「規制庁」という。）に対して、次の請負業務を実施する。局部破損の損傷力学解析法について、理論・モデル等を調査するとともに、規制庁で整備した損傷力学解析コードについて、ベンチマーク解析を実施する。また規制庁で実施した要素試験、弾塑性破壊靱性試験等の弾塑性解析・損傷力学解析を行う。

さらに、解析における材料パラメータの設定を自動化する最適化システムを検討するとともに、損傷力学解析コードの高速化等の検討を行う。

1.2 調達の具体的内容

「平成 31 年度原子炉格納容器の局部破損解析手法の検討及び要素試験の解析」の調達仕様書」による。

1.3 納入期限

令和 2 年 3 月 23 日

2. 登録内容

- 1) 事業者名
- 2) 連絡先（住所、TEL、FAX、E-mail、担当者名）
※登録例は別紙を参照のこと。

3. 留意事項

- ・ 登録後、必要に応じ事業実施計画等の概要を聴取する場合があります。
- ・ 本件への登録に当たっての費用は事業者負担になります。

- ・ 本調査の依頼は、入札等を実施する可能性を確認するための手段であり、契約に関する意図や意味を持つものではありません。
- ・ 提供された情報は省内で閲覧しますが、事業者に断りなく省外に配布することはありません。
- ・ 提供された情報、資料は返却いたしません。

4. 提出先

郵送またはE-mailにてご提出願います。

【提出先】 〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9
原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門 中村 均 宛て

【E-mail】 hitoshi_nakamura@nsr.go.jp

(別紙、登録例)
平成〇年〇月〇日

原子力規制委員会
原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門

平成 31 年度原子炉格納容器の局部破損解析手法の検討及び要素試験の解析

平成〇年〇月〇日付、標記実施要領に従い、以下の事項を登録致します。

登録内容

(1) 事業者名 ○○

(2) 連絡先

住所 ○○

TEL ○○

FAX ○○

E-mail ○○

担当者名 ○○

平成 31 年度原子炉格納容器の局部破損解析手法の検討及び要素試験の解析 調達仕様書

1. 件名

平成 31 年度原子炉格納容器の局部破損解析手法の検討及び要素試験の解析

2. 目的

本事業は平成 31 年度安全研究プロジェクト「重大事故時の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究」の一環として、鋼製部材に対する局部破損に係る解析手法の検討及び要素試験の解析等を行うことを目的とする。

3. 1 実施概要

局部破損の詳細解析法である損傷力学解析法について、主にせん断型延性破壊の理論・モデル等の調査を実施する。次に、平成 30 年度業務にて、汎用構造解析コード FINAS/STAR をベースソフトとして作成した損傷力学解析コードを、他のコードと比較するベンチマーク解析を実施し、コードを検証する。また、原子力規制庁で実施した切欠付引張試験の弾塑性解析・損傷力学解析を実施する。さらに鋼製格納容器のシェルモデル試験体¹の弾塑性解析・損傷力学解析を実施する。

損傷力学解析の亀裂進展問題への適用性を評価するために、弾塑性破壊靱性試験の損傷力学解析を実施し、試験と解析の J-R カーブ等と比較する。

解析における材料パラメータの設定を自動化する最適化システムの検討を行うとともに、損傷力学解析コードの高速化等の検討を行う。

3. 2 損傷力学解析法等の調査

局部破損の評価に適用可能な損傷力学モデルの理論、適用例及び数値解析法等に関する調査を行う。主な調査課題は以下のとおりとする。

- ・ せん断型延性破壊の損傷力学モデル（平坦破壊からせん断破壊への遷移等を含む）
- ・ せん断型の延性亀裂進展への弾塑性破壊力学解析法の適用性
- ・ ぜい性破壊の損傷力学モデル（延性亀裂からの遷移等の扱い）

上記課題について、関連の文献を調査するとともに、理論、有限要素法コードへの実装方法、解析例等の情報を含む技術報告をまとめる。なお、調査報告に当たって、未発表・非公開等の情報を含む場合には、その部分を明記すること。本事業の報告書（国会図書館納本分）において、当該部分を非開示とする予定。

3. 3 損傷力学解析コードのベンチマーク

平成 30 年度までに作成した応力制御型のボイド生成項 GTN モデルの解析コード

¹財団法人原子力発電技術機構「原子炉格納容器信頼性実証事業」（昭和 62 年度～平成 14 年度）

(ベースコード FINAS/STAR) のベンチマーク (性能比較・評価) を実施する。ベンチマークでは、同等の定式のボイド生成項を組み込んだ FINAS/STAR 以外の損傷力学解析コードを用いて、切欠試験片の引張試験の解析を行い、結果を比較・分析する。実施項目は下記を含むものとする。

- ① FINAS/STAR 以外の損傷力学解析コードへのボイド生成項の組み込み
- ② 両コードによる切欠付丸棒引張試験の解析の実施
最大 10 ケース (2 試験体×モデルパラメータ 5 種を見込む。)
- ③ 両解析コードの解析結果の比較及び差異の分析
- ④ 規制庁側解析コードの修正 (問題・改良点が見つかった場合)

以下の解析及び検討では、FINAS/STAR を使用する。

3. 4 H29 年度供試材の切欠付丸棒引張試験の弾塑性解析・損傷力学解析

H29 年度に実施した SGV480 鋼 (TMCP 材) 及び SPV490 鋼の切欠付丸棒引張試験の弾塑性解析及び損傷力学解析を行う。実施項目は下記を含むものとする。

- ① 試験データを再整理し、圧延方向及び板厚方向の特性を平均化した材料定数の代表値及び変形特性を得る。
- ② 試験片の FEM モデル (H29 年度作成済み) を用いて、弾塑性解析を実施し、材料定数を最適化する。最適化では、材料定数を代表値から摂動させ、試験片の変形特性を最も適切に表現する材料定数を求める。
- ③ 損傷力学解析を実施して、損傷力学パラメータを最適化する。最適化では、主に介在物の体積率等を調整し、試験片の損傷挙動を最も適切に表現する損傷力学パラメータを求める。
- ④ 最適なパラメータを用いて、解析を継続し、最終的なシェアリップ形成挙動を追跡する。必要に応じて計算安定化のために、収束パラメータ等の調整を行う。

解析ケース数は、以下を見込む。

- ・ 試験片数：6 個 (=2 鋼種×3 試験片)
- ・ 弾塑性解析の解析ケース数：30 回 (=6 試験片×5 回)
- ・ 損傷力学解析の解析ケース数：12 回 (=6 試験片×2 回)

試験材の引張試験結果等、解析に必要なデータは原子力規制庁担当者から提供する。以下同様とする。

3. 5 H29 年度供試材の切欠付平板引張試験の弾塑性解析

H29 年度に実施した SGV480 鋼 (TMCP 材) 及び SPV490 鋼の切欠付平板試験の弾塑性解析を行う。実施項目は下記を含むものとする。

- ① 試験片の FEM モデル (H29 年度作成済み) を用いて、切欠付丸棒試験片で求めた材料定数を用いて、弾塑性解析を実施する。
- ② 弾塑性解析の負荷過程における、切欠底及び切欠の板厚中心における評価パラメータの遷移を整理し、プロットする。評価パラメータには、応力三軸度、相

当ひずみ、流動応力、平均応力、破損指標、ロード角等を含むものとする。

解析ケース数は、以下を見込む。

- ・ 試験片数：2個（＝2鋼種×1試験片、板厚14mmの試験片）
- ・ 弾塑性解析の解析ケース数：4回（＝2試験片×2回）

3. 6 H30年度供試材の切欠付丸棒引張試験の弾塑性解析・損傷力学解析

H30年度に実施したSGV480鋼（焼きならし材）及びSPV490鋼の切欠付丸棒引張試験の弾塑性解析及び損傷力学解析を行う。実施項目は下記を含むものとする。

- ① 試験データを再整理して、圧延方向及び板厚方向の特性を平均化した材料定数の代表値及び変形特性を得る。
- ② 試験片のFEMモデルを作成して、弾塑性解析を実施し、材料定数を最適化する。
- ③ 損傷力学解析を実施して、損傷力学パラメータを最適化する。
- ④ 最適なパラメータを用いて、解析を継続し、最終的なシェアリップ形成挙動を追跡する。必要に応じて計算安定化のために、変位増分等の調整を行う。

解析ケース数は、以下を見込む。

- ・ 試験片数：6個（＝2鋼種×3試験片）
- ・ 弾塑性解析の解析ケース数：30回（＝6試験片×5回）
- ・ 損傷力学解析の解析ケース数：12回（＝6試験片×2回）

3. 7 H30年度供試材の切欠付平板引張試験の弾塑性解析・損傷力学解析

H30年度に実施したSGV480鋼（TMCP材）及びSPV490鋼の切欠付平板試験の弾塑性解析及び損傷力学解析を行う。実施手順を以下に示す。

- ① 試験片のFEMモデルを作成して、切欠付丸棒試験片で求めた材料定数を用いて、弾塑性解析を実施する。
- ② 弾塑性解析の負荷過程における、切欠底及び切欠の板厚中心における評価パラメータの遷移を整理し、プロットする。評価パラメータには、応力三軸度、相当ひずみ、流動応力、平均応力、破損指標、ロード角等を含むものとする。
- ③ 切欠付丸棒試験片で得られた損傷力学パラメータを用いて、損傷力学解析を実施する。

解析ケース数は、以下を見込む。

- ・ 試験片数：6個（＝2鋼種×3試験片、板厚20mmの試験片）
- ・ 弾塑性解析の実行ケース数：12回（＝6試験片×2回）
- ・ 損傷力学解析の実行ケース数：12回（＝6試験片×2回）

3. 8 シェルモデル試験体の全体モデルの弾塑性解析

H29年度業務にて作成したシェルモデル試験体のFEMモデルに対して、溶接変形等

を与える等の修正を行い、弾塑性解析を実施する。解析結果を、試験結果²と比較することにより、溶接の変形量、接触壁との接触条件等に必要な修正を加えることを繰り返し、FEM モデルを最適化する。

解析ケース数及び計算実行数は、以下を見込む。

- ・ モデル数：3 個（＝溶接変形等 3 ケース）
- ・ 弾塑性解析の実行ケース数：9 回（＝3 モデル×3 回）

3. 9 シェルモデル試験体の局部モデルの弾塑性解析・損傷力学解析

機器ハッチ周辺の局部モデルを作成し、全体モデルの荷重・変位を境界条件に与えて、弾塑性解析を行う。局部破損を評価するためには、破損前のネッキング変形を再現する必要があるため、十分、細密なメッシュ分割を行う。さらに、弾塑性解析の解析結果を用いて局部破損の評価を行う。局部破損の評価では、破損位置に評価断面を設定し、断面上及び評価ラインの破損指標の分布を得るものとする。破壊指標は以下の 3 種類とする。

- a) 流動応力と平均応力の和
- b) 3 軸ひずみ（試験の最適曲線）
- c) 3 軸ひずみ（ASME BPVC.VIII. Div.2, 5.33 Elastic-Plastic Analysis、実測した絞りに基づく）

次に、必要に応じて、破損部をメッシュをさらに細密にする等の修正を加えた FEM モデルを用いて、損傷力学解析を実施する。圧力・変形の増加に伴う評価断面及び評価ライン上の損傷（ボイド率）の遷移を追跡した解析結果をまとめる。解析ケース数は、以下を見込む。

- ・ モデル数：2 個（メッシュ分割粗密：2 個）
- ・ 弾塑性解析の解析ケース数：6 回（＝2 モデル×3 回）
- ・ 損傷力学解析の解析ケース数：6 回（＝2 モデル×3 回）

3. 10 弾塑性破壊靱性試験の損傷力学解析

H30 年度に実施した SGV480 鋼及び SPV490 鋼の弾塑性破壊靱性試験の損傷力学解析を行う。実施手順を以下に示す。

- ① CT 試験片の FEM モデルを作成して、切欠付丸棒試験片で求めた材料定数を用いて、弾塑性解析を実施する。亀裂長さを 3 種類程度変えた解析を行い、試験により得られた J-R カーブと解析結果から得られた J-R カーブを比較する。J-R カーブの決定方法は、ASTM-E1820 に準拠する。試験結果との差が大きい場合には、モデルまたは材料定数に修正を加える。
- ② 切欠付丸棒試験片で得られた損傷力学パラメータを用いて、損傷力学解析を実施する。解析は、変位制御にて実施するが、亀裂の進展量が、試験と同程度か、それ以上になるまで、計算を継続する。
- ③ 損傷力学解析から得られる亀裂の進展量をもとに、J-R カーブを生成し、試験

² NUREG/CR- 5679 Design, Instrumentation, and Testing of a Steel Containment Vessel Model, 1998 等

結果と比較・分析する。また破面性状の変化等を追跡し、試験結果と比較する。損傷力学パラメータを調整し、最適な解析結果を得る。

解析ケース数及び計算実行数は、以下を見込む。

- ・ 試験片数：4 個（＝2 鋼種×2 試験片形状（サイドグループ有り、無し））
- ・ 弾塑性解析の計算実行数：12 回（＝4 試験片×3 回）
- ・ 損傷力学解析の計算実行数：12 回（＝4 試験片×3 回）

3. 1 1 材料パラメータの最適化システムの検討

切欠付丸棒試験片等の解析における材料パラメータ最適化の精度及び効率を向上させるために、最適化を自動で行うシステムを検討する。検討するシステムは、弾塑性解析における材料パラメータを最適化するものとするが、損傷パラメータの最適化への拡張も可能とする設計とする。実施項目は以下を含むものとする。

- ① 最適化アルゴリズム・システムの設計
- ② 検討
- ③ 性能試験

性能試験では、2 鋼種の引張試験の解析に最適化システムを適用し、決定された材料パラメータの収束状態、手動計算との差等を比較・分析する。

3. 1 2 損傷力学解析コードの高速化等の検討

損傷力学解析コードの高速化及び計算安定性の向上のために、コード改良の検討を行う。コード改良の詳細は、原子力規制庁担当と協議して決定するが、動的陽解法及び収束アルゴリズムの改良（弧長法等）を含むものとする。実施項目を下記に示す。

- ① 改良内容の設計
- ② 改良
- ③ 性能試験

性能試験では、代表的な切欠付丸棒引張試験の解析を行い、亀裂進展時の安定性、解析時間等への効果を評価する。

3. 1 3 技術資料の作成

成果報告書及び資料集をまとめる。

- 1) 成果報告書（本冊）
- 2) 資料集
 - ・ メッシュ、出力図面等の図面集
 - ・ 検証記録
 - ・ 文献等

なお、3.2 項から 3.13 項までの実施項目の詳細は、原子力規制庁担当と受注者

の協議によって、変更する場合がある。

3. 実施期間

契約締結日から令和2年3月23日まで

4. 作業工程

実施期間における各実施項目の概略工程(例)を以下に示す。受注者は、業務開始時に、実施計画を示すものとする。

実施項目	平成31年度		
	6月～9月	10月～12月	1月～3月
1) 損傷力学解析法の調査		—————	
2) 損傷力学解析コードのベンチマーク	—————		
3) H29年度供試材の切欠付丸棒引張試験の弾塑性解析・損傷力学解析	—————		
4) H29年度供試材の切欠付平板引張試験の弾塑性解析	—————		
5) H30年度供試材の切欠付丸棒引張試験の弾塑性解析・損傷力学解析		—————	
6) H30年度供試材の切欠付平板引張試験の弾塑性解析・損傷力学解析		—————	
7) シェルモデル試験体の全体モデルの弾塑性解析	—————		
8) シェルモデル試験体の局部モデルの弾塑性解析・損傷力学解析		—————	
9) 弾塑性破壊靱性試験の損傷力学解析		—————	
10) 材料パラメータの最適化システムの検討		—————	
11) 損傷力学解析コードの高速化の検討		—————	
12) 技術資料の作成			—————

5. 作業場所

受注者の作業場所で作業するものとし、定期的に作業進捗報告を行う。

(作業進捗報告の日程等は作業開始時に原子力規制庁と協議する。)

6. 実施責任者及び実施体制

受注者は、実施責任者及び品質管理体制を明示した実施体制表を提出すること。あらかじめ下請負者が決まっている場合は、下請負者名及びその発注業務内容を含めて記載すること。ただし、金50万円未満の下請負業務、印刷費、会場借料、翻訳費及びその他これに類するものを除く。

実施責任者は本作業の遂行にあたり十分な実務能力及びマネジメント能力を有し、本作業を統括する立場にある者とする。

実施体制には必ず本件に精通した経験豊富なスタッフを含めること。また、2人以上の直接の担当者を定め、一方が出張などの時にも支障なく業務が遂行できるようにすること。

7. 提出書類及び納入品目

(1) 提出書類

受注者が原子力規制庁の承認を受けるため、又は原子力規制庁に報告するために提出する書類、提出部数、提出期日は、次のとおりとする。

	提出書類	提出部数	提出期日
1	実施体制表	1	契約締結後1週間以内、変更時は改訂版を速やかに提出すること
2	実施計画書	1	契約締結後1週間以内
3	下請負届	1	契約締結後1週間以内 該当しない場合は省略できる。
4	品質計画書 ^(注1)	1	契約締結後1週間以内に提出し、原子力規制庁の承認を受けること。
5	情報セキュリティ管理説明書	1	契約締結後1週間以内に提出し、原子力規制庁の承認を受けること。
6	打合せ議事録	1	打合せ後1週間以内
7	月報	1	翌月10日まで(3月は納入時まで)
8	成果報告書 ^{(注2)(注3)}	8+2(電子媒体) 1(ハードコピー)	納入時
9	情報セキュリティ管理報告書	1	納入時
10	完了届	1	納入時

注1) 品質計画書の品質要求事項は7. によるものとする。

注2) 成果報告書の本冊を、電子情報媒体にて8部提出すること(PDF形式)。また、検収時の内容確認用にハードコピーを1部提出すること。

注3) 成果報告書の本冊に加え、以下の内容を格納した電子情報媒体を2部提出すること。

- ・ 解析計画等の中間成果物(PDF及びMS-WORD形式)
- ・ 資料集(調査文献、図面、図表等の補足資料、PDF及びMS-WORD形式)
- ・ 上記1から6及び8の提出書類(PDF形式)
- ・ 作表、作図に用いたMS-EXCEL等のファイル

- ・ 破損評価等の後処理プログラム(MS-EXCEL等)
- ・ 解析に使用した入力データ
- ・ 検討したソースコード
等

なお、ファイル名は報告書記載内容と対応付けた分かりやすいものとし、適宜説明を加えること。

(2) 納入品目及び納入場所

(a) 納入品目：(1) に定める提出書類

(b) 納入場所：原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループシステム安全研究部門

東京都港区六本木1-9-9 六本木ファーストビル 15F

8. 品質計画書

品質計画書には最小限、以下の内容を記載すること。

(1) 品質管理体制

受注業務に対する品質を確保するための、十分な体制が構築されていること。

- ・ 作業実施部署は品質管理部署と独立していること。
- ・ 実施責任体制が明確となっていること（実施責任者と品質管理責任者は兼務しないこと）。

(2) 品質管理の具体的な方策

受注業務に対して品質を確保するための、当該業務に対応した具体的な作業に関する方法（チェック時期及びチェック内容）が明確にされていること。

(3) 担当者の技術能力

業務に従事する者の技術能力を明確にすること。

9. 検収条件

本仕様書に記載の内容を満足し、7. に記載の提出書類が全て提出されていることが確認されたことをもって検収とする。

10. 情報セキュリティの確保

受注者（請負者）は、以下の点に留意して情報セキュリティを確保するものとする。

- (1) 受注者は、請負業務の開始時に、請負業務に係る情報セキュリティ対策とその実施方法及び管理体制について原子力規制庁担当者に書面で提出すること。
- (2) 受注者は、原子力規制庁担当者から要機密情報を提供された場合には、当該情報の機密性を格付けに応じて適切に取り扱うための措置を講じること。
- (3) また、本業務において受託者が作成する情報については、原子力規制庁担当者からの指示に応じて適切に取り扱うこと。
- (4) 受注者は、原子力規制委員会情報セキュリティポリシーに準拠した情報セキュリティ対策の履行が不十分と見なされるとき又は受注者において請負業務に係

- る情報セキュリティ事故が発生したときは、必要に応じて原子力規制庁担当者の行う情報セキュリティ対策に関する監査を受け入れること。
- (5) 受注者は、原子力規制庁担当者から提供された要機密情報が業務終了等により不要になった場合には、確実に返却し又は廃棄すること。
また、請負業務において受注者が作成した情報についても、原子力規制庁担当者からの指示に応じて適切に廃棄すること。
- (6) 受注者は、本業務の終了時に、業務で実施した情報セキュリティ対策を報告すること。

(参考) 原子力規制委員会情報セキュリティポリシー

<https://www.nsr.go.jp/data/000129977.pdf>

1 1. 業務の引継ぎ

(1) 用語の定義

- ア 前回の受注者：前回の業務を請負った業者
イ 受注者：本仕様書に基づく入札で落札した業者
ウ 次回の受注者：本仕様書に基づく受注者の契約終了後の入札で落札した業者

(2) 前回の受注者からの引継ぎ

原子力規制庁は、当該引継ぎが円滑に実施されるよう、前回の受注者及び受注者に対して必要な措置を講ずるとともに、引継ぎが完了したことを確認する。

本業務を新たに実施することとなった受注者は、本業務の開始までに、業務内容を明らかにした書類等により、前回の事業者から業務の引継ぎを受けるものとする。

なお、その際の事務引継ぎに必要となる経費は、前回の受注者の負担となる。ただし、資材の搬出費等の直接経費が発生する場合は、受注者が負担するものとする。

(3) 本業務終了の際に受注者の変更が生じた場合の引継ぎ

原子力規制庁は、当該引継ぎが円滑に実施されるよう、受注者及び次回の受注者に対して必要な措置を講ずるとともに、引継ぎが完了したことを確認する。

本業務の終了に伴い受注者に変更になる場合には、受注者は次回の受注者の当該業務の開始日までに、業務内容を明らかにした書類により、次回の受注者に対し、引継ぎを行うものとする。

なお、その際の事務引継ぎに必要となる経費は、受注者の負担となる。

1 2. その他

- (1) 受注者は、本仕様書に疑義が生じたとき、本仕様書により難しい事由が生じたとき、あるいは本仕様書に記載のない細部については、原子力規制庁担当者と速やかに協議し、その指示に従うこと。
- (2) 受注者は、本業務において納入する全ての成果物について、瑕疵担保責任を負うものとする。瑕疵担保責任期間は当庁により検収後1年間とする。

- (3) 作業実施者は、原子力規制庁担当者と日本語で円滑なコミュニケーションが可能で、かつ良好な関係が保てること。
- (4) 業務上不明な事項が生じた場合は、原子力規制庁担当者に確認の上、その指示に従うこと。
- (5) 常に、原子力規制庁担当者との緊密な連絡・協力関係の保持及び十分な支援を提供すること。
- (6) 本調達において納品される成果物の著作権は、検収合格が完了した時点で、当庁に移転する。受注者は、成果物の作成に当たり、第三者の工業所有権又はノウハウを実施・使用するときは、その実施・使用に対する一切の責任を負う。
- (7) 成果物納入後に受注者の責めによる不備が発見された場合には、受注者は、無償で速やかに必要な措置を講ずること。

(以上)