

令和元年度原子力施設等防災対策等委託費（アーク放電に関わる電気火災モデル整備）事業に係る入札可能性調査実施要領

令和元年10月3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

原子力規制庁では、令和元年度原子力施設等防災対策等委託費（アーク放電に関わる電気火災モデル整備）事業の受託者選定に当たって、一般競争入札（価格及び技術力等を考慮する総合評価方式）に付することの可能性について、以下の通り調査します。

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、的確な事業遂行が可能であり、かつ、当該事業の受託者を決定するに当たり一般競争入札（価格及び技術力等を考慮する総合評価方式）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．提出先までご登録ください。

1．事業内容

1.1 概要

近年、国内外の原子力発電所などを含む電気設備においては、高エネルギーアーク損傷（HEAF：High Energy Arcing Fault。以下「HEAF」という。）と呼ばれる大規模アーク放電を伴う電気故障が発生している。この HEAF はアーク放電を伴って生じる爆発性電気故障のことである。例えば、高圧電気盤、配電盤等の電気設備において、ブスバー、遮断器や開閉器などの通電された導体間や、あるいは通電された機器と接地（アース）の間において何らかの故障原因（接続不良、絶縁劣化、導電性異物の混入による短絡など）により大電流のアーク放電が発生する。この場合、アーク放電において、熱、光、金属の蒸発及び圧力上昇を伴って急激なエネルギーの放出が起こる。このようなアークを通じた急激なエネルギー放出を伴う電気故障が HEAF である。アーク放電により高い圧力や熱流束が発生し、これらが電源盤・配電盤自身などに大きな損傷を与える。さらにアーク放電に起因する熱の影響により機器等が加熱され高温になり、二次火災が発生する場合がある。

HEAF 事象の規模などを検討するためには、HEAF 時に発生する大気圧大電流アーク放電の特性を、実験的・理論的アプローチにより明らかにすることが極めて重要である。これまでに様々な模擬電気盤などにより「実験的」にアーク放電を伴う短絡故障を生じさせ、そのアーク放電への入力電力、周囲への影響などが調べられている。しかし、実験的アプローチだけではすべての個別の電気盤における HEAF 事象について検討することは容易ではない。さらには、実験的に得られたデータ（例えば電流電圧や損傷度合）を説明・解釈するためには、アークプラズマ自身の特性を詳細に把握する必要がある。

例えば、電流増加時に対する挙動や、金属蒸気混入によるアーク電流電圧特性への影響、アークから放出される熱流束への影響などが把握すべき特性である。このため実験的なアプローチだけでなく、理論・数値解析的にアーク放電の特性を詳細に明らかにすることが必要不可欠である。アークは極めて複雑な物理現象を包含し、熱流体と電磁場とが相互作用する超高温の電磁熱流体として取り扱う必要がある。理論数値解析的にアーク放電の特性を明らかにし、圧力上昇、生じる高熱流を検討することにより、HEAF が与える影響について詳細なモデルを用いた検討が可能となる。

本事業では、空気及び空気に金属蒸気が混入した場合（1種類の金属蒸気及び2種類以上の金属蒸気の混合）の粒子組成、熱力学特性、輸送特性を明らかにする。さらにこれらの特性を用いて、数 kA から数十 kA 級の大電流空気アーク、金属蒸気混入アーク、複合金属混入空気アークの電磁熱流体解析モデルを構築する。

本年度はアーク放電に関わる電気火災モデル整備を目的として、以下の項目を実施する。

- (1) 金属蒸気(Fe、Cu、Al)が混入した高温空気の粒子組成、熱力学特性及び輸送特性の原子・分子論的計算
- (2) 数 kA～数十 kA 級大電流空気アークプラズマの電磁熱流体解析モデルの検討
- (3) 1種類の金属蒸気が混入した大電流空気アークプラズマの電磁熱流体解析モデルの検討
- (4) 2種類の金属蒸気が混入した大電流空気アークプラズマの電磁熱流体解析モデルの検討

1. 2 事業の具体的内容

大電流故障アークは空気中で成立し、かつ金属が電極として作用することから金属蒸気が混入した高温状態となっている。その様相を把握するために、まず高温空気及び高温空気に金属蒸気が1種類混入した場合の粒子組成・熱力学輸送特性を原子・分子論的計算により明らかにする。ここで、金属蒸気として電気設備に使用される鉄、銅、アルミニウムを対象とする。特にアルミニウムは酸化反応による膨大な熱を放出する傾向があり、その HEAF への寄与も懸念される。ここでは高温空気が有する比熱、比エンタルピー等の「熱力学特性」及び導電率、粘性係数、熱伝導率等の「輸送特性」を様々な温度・金属蒸気混入量条件(温度：300-30,000 K、金属蒸気混入量：0-100 %)において数値計算を行う。

さらに上記の計算した熱力学特性・輸送特性を用いて、金属電極間に成立するアークプラズマの「電磁熱流体解析モデル」によるアーク挙動の把握を行う。アークプラズマは電磁熱流体として取扱い、アークの数値解析モデルを構築する。電流値数 kA から数十 kA 級大電流アークを対象として、質量・運動量・エネルギーの保存方程式を立てる。さらに電磁場との相互作用も考慮する。このモデルを用いて、アークの温度、ガス流速場、アークからの熱流束・放射パワーなどを明らかにする。電極としてまずは1種類の

金属(Fe, Cu, Al)である場合を想定して、その蒸発と蒸気混入を考慮した場合のモデル構築を検討する。さらに、異なる2種類の金属電極間に成立するアークを対象としたモデル構築を検討する。これらのアプローチにより、金属蒸気混入がアークプラズマとその挙動に与える影響などについて検討する。実際の HEAF においてもアークは1種類だけでなく2種類の金属間に成立する場合が存在する。これらのモデルによりアークからの、空間温度分布の変化、流れ分布の変化、空間圧力の上昇に対する影響なども検討する。

(1) 金属蒸気(Fe, Cu, Al)が混入した高温空気の粒子組成、熱力学特性及び輸送特性の原子・分子論的計算

故障アークは金属導体間の空気中で成立する。空気はおもに 78%N₂+22%O₂ から構成される。これにこれらの金属蒸気が混入する。アーク放電になるとその温度 300-30,000 K となる。この場合、空気の成分が解離しさらには NO, NO_x が構成され、さらに温度が高くなると N, O の原子さらにはこれらの粒子が電離し、イオン N⁺, O⁺及び電子 e などで構成される。さらに故障アークには金属導体の蒸気が含まれることが想定される。このことから金属蒸気が混入した高温空気の粒子組成を計算する。例えば銅(Cu)が混入した場合には、Cu, Cu⁺, Cu²⁺のほか、CuO などの化合物の影響についても確認する。Al 蒸気, Fe 蒸気が混入した場合についても同様に取扱い、粒子組成をそれぞれ計算する。さらにこれらが複数同時に存在する場合には、どの粒子が電離しやすいか、負イオンを生成するかにより粒子組成が大きく変化することが予想される。

前節で計算した金属蒸気が混入した空気の粒子組成の計算結果を用いて、このガスに対する質量密度、比エンタルピー、定圧比熱などの熱力学特性を計算する。これらの熱力学特性は、高温空気が保持できるエネルギー、温度上昇、圧力上昇、圧力伝搬などを計算・検討するために必要不可欠な特性である。これらについても温度 300-30,000 K までを対象とする。さらに粒子組成の計算結果を用いて、1種類および2種類の金属蒸気が混入した空気の輸送特性を計算する。輸送特性としては、粘性係数、熱伝導率、導電率を計算する。これらは、それぞれ流れの運動量、熱流、電流の導通状態に大きく影響し、電磁熱流体解析に必要な不可欠なデータとなる。輸送特性の計算にあたっては、各構成粒子間の衝突断面積を考慮して温度 300-30,000 K にわたって計算する。輸送特性の一つとして放射係数がある。放射パワーは大電流アーク内のエネルギーバランスを決定する一つの要因になる。これらの放射係数についても、単原子、単原子イオンからの線スペクトル、制動放射及び再結合放射による連続スペクトルを考慮して計算する。本計算においては、金属蒸気として Fe, Cu, Al を対象とする。

(2) 数 kA~数十 kA 級大電流空気アークプラズマの電磁熱流体解析モデルの構築

ここでは kA から数十 kA クラス(1 kA-20 kA, 50kA 以上についても検討)の電流で維持されるアークプラズマの電磁熱流体解析モデルを構築する。アークプラズマは局所熱平

衡状態が成立するために、熱流体として取り扱う。これにさらに電磁場からの影響として、ローレンツ力とジュール加熱の効果を考慮する。アーク挙動を明らかにするためにアークプラズマとその周囲ガスに対して、質量保存・運動量保存・エネルギー保存の各方程式を立てる。運動量保存式にローレンツ力項を組み込み、エネルギー保存式にジュール加熱項を組み込む。求めるべき電磁場については、電場は電流連続の式からのポアソン方程式を解くことで計算できる。磁場についてはアンペールの法則から計算する。

これまでに、径方向-軸方向 2 次元モデルをある程度構築している。これをベースとしたアーク電磁熱流体解析モデルをさらに計算空間を拡大し電極が対向した形とする。このモデルにより、kA 級の交流電流の半から数サイクルでのアークの振る舞いまでを計算できるように改良する。特に大電流アークをシミュレーションするために電極の直径・電極間隔を大きくし、これにより 50kA 級アークの計算ができるか検討する。さらに同一条件において電極の直径を変更した場合にアーク放電の直径（温度 5,000 K 以上になる領域で定義）や流速変化がどのように影響をうけるかも検討する。さらに大電流アークから放出される熱流束の時間変化、電流ピーク値依存性を計算する。

(3) 1 種類の金属蒸気が混入した大電流空気アークプラズマの電磁熱流体解析モデルの構築

一方で、金属電極の蒸発、さらには金属蒸気が混入する効果までも考慮できるモデルを構築する。故障アークは金属と接触しており、金属の加熱・蒸発が生じている。電極の加熱についてはジュール発熱のほか、イオン表面再結合による加熱を考慮する。電極近傍における電子放出現象（熱電子放出、電界放出など）を考慮し、電極先端が加熱される効果を組み込む。さらに電極先端の温度上昇により電極金属が蒸発するモデルを Hertz-Knudsen の式に基づいて組み込む。これによりアークに金属蒸気が混入する量が経験的でなく物理的に決定されるモデルとなる。さらに電極として「陰極」と「陽極」を区別して個別にモデリングを行い、それぞれにおいて電極先端現象を考慮する。

上記のように構築した計算モデルを用いて、まずは 1 種類の金属間でアークが発生する場合を対象として、アークプラズマの電磁熱流体挙動を検討する。ここではアーク温度変化、流速分布変化、圧力分布変化、金属蒸気の混入分布変化などに着目する。アークから放出される熱流束・放射パワーの時間変化についても検討する。金属蒸気が入ることにより、放射パワーは格段に大きくなる。このモデルにおいても電極間隔・電極直径の依存性を検討する。

(4) 2 種類の金属蒸気が混入した大電流空気アークプラズマの電磁熱流体解析モデルの構築

さらに、電極が 1 種類だけでなく、2 種類の場合も想定し異なる金属間でアークが発生する場合についても、モデルの構築を行う。この場合、電極形状は対向電極とする。金

属はそれぞれ融点沸点のほか、仕事関数も異なるため、その性状に大きな差が生じることが予想される。そのため、アークが対称からずれ偏りが生じることが考えられる。そのようなことが構築した予測できるか検討する。具体的にはCu-Fe, Al-Feの組み合わせを想定する。構築したモデルにより、与えた電流に対するアーク電圧、アーク温度の分布、ガス流速分布などを明らかにしていく。

(5) 取りまとめ

得られた試験結果を報告書として取りまとめる。

1. 3 事業の進捗管理

原子力規制庁に対して、品質保証計画書等を提出の上、これによる試験・解析結果の品質保証及び事業の進捗状況を報告し、漏れの無いように計画内容を遂行する。

1. 4 報告書の作成及び納入

1. 2の成果をまとめた業務成果報告書を作成し、印刷物8部、業務成果報告書（報告書作成に当たり、参考資料等を用いた場合はそれも含める）を格納した電子媒体電子媒体（CD-ROM等）1式を納入すること。

1. 5 事業期間

契約締結日から令和2年3月13日まで

1. 6 事業実施条件

（研究機材の使用）

- 本事業では、必要に応じて原子力規制庁が貸与する研究機材（別添1参照）を用いることができるものとする。
- 別添1の研究機材の貸与は無償とするが、移転費用は全額受託者が負担すること。
- 貸与する研究機材は、本事業の目的以外には使用せず、事業終了後は受託者の責任において返却すること。

（著作物等の公表）

- (1) 委託業務の成果に係る知的財産権を原子力規制委員会が受託者から譲り受けない場合、受託者は、委託業務の成果によって生じた著作物及びその二次的著作物並びに委託業務の内容（以下「著作物等」という。）を公表しようとするときは、原則、公表30日前までに、別添2に示す仕様書様式第1「著作物等公表届」を提出すること。
- (2) 委託業務の成果に係る知的財産権を原子力規制委員会が受託者から譲り受け

る場合、受託者は次の項目に同意したものとする。

- ① 原子力規制委員会の許可を得ないで著作物等を公表しないこと。
- ② 納入物に関して著作権者人格権を行使しないこと。また、納入物の著作権者が受託者以外の者であるときは、当該著作権者が著作権者人格権を行使しないように必要な処置をとること。
- (3) 上記(2)及び(3)については、委託業務を完了した後であっても、なおその効力を有するものとする。

1. 7 情報セキュリティの確保

受託者は、下記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) 受託者は、本事業の開始時に、本事業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官に書面で提出すること。
- (2) 受託者は、原子力規制庁担当官から要機密情報を提供された場合には、当該情報の機密性の格付けに応じた適切に取り扱うための措置を講ずること。
また、請負業務において受託者が作成する情報については、原子力規制庁担当官からの指示に応じた適切に取り扱うこと。
- (3) 受託者は、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託者において本事業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官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。
- (4) 受託者は、原子力規制庁担当官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、本事業において受託者が作成した情報についても、原子力規制庁担当官からの指示に応じた適切に廃棄すること。
- (5) 受託者は、本事業の終了時に、本事業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. 8 実施に当たっての安全確保

業務の実施に当たっては、安全確保に関する法令を遵守し、受託者の責任において安全確保を維持すること。

2. 登録内容

- ① 事業者名
- ② 連絡先（住所、TEL、FAX、E-mail、担当者名）

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、資料については返却しません。

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

松田 航輔 宛て

【TEL】 03-5114-2223

【FAX】 03-5114-2233

【E-mail】 kosuke_matsuda@nsr.go.jp

(別添1)

研究機材の品名と設置場所

1. 研究機材一覧

品名	型式	数量
高速度カメラ	MEMCAM HX-5	2 式
ワークステーション	HPC2000-XL104 TS-Silent	5 台
制御用 PC	Endeavor NJ5970E	1 台
2 画像分光装置	AN-IMC-DD	1 式
レンズ	AF-S Nikkor 70-200mm f/2.8E FL ED VR	1 式
レンズ	AF-S Nikkor f/4.5-5.6G 80-400mm ED	1 式
オシロスコープ	テクシオ・テクノロジー 品番 GDS-2304A 2GS/s 2ch/4ch デジタルストレージオ シロスコープ GDS-2000A シリーズ	1 式
ロゴスキーコイル	Tektronics TRCP3000 DC~2KHz 2000A	1 式
デジタル遅延パルス発生器	米国スタンフォードリサーチシステム ズ社 DG645 10MHz (GPIB、RS232、 Ethernet 付)	1 式
高電圧プローブ	PMK (IWATSU) 高電圧プローブ (1000 : 1) PHV4002 シリーズ 品番 PHV4002-3-R0	2 個
ハイパフォーマンス計算機	HPC システムズ HPC2000-KBL104TS - Silent (3.7M8-4/1-32GB-win10-IFC- VSP-35844)	5 台

2. 研究機材の設置場所

石川県金沢市角間町ヌ7 番地

国立大学法人金沢大学

※上記設置場所より試験装置を移転する場合は、かかる費用については受託者が全て負担すること。また移転に係る上記研究機関との折衝については、全て受託者が責

任を持って実施すること。

(別添2)

仕様書様式第1

令和〇〇年〇月〇日

支出負担行為担当官
原子力規制委員会原子力規制庁長官官房参事官
×× ×× 殿

住 所
名 称

代表者氏名

印

著作物等公表届

著作物等を下記のとおり公表いたしますので、届け出ます。

記

1. 契約件名等

契約締結日		契約締結時の記号 番号	
契約件名			

2. 公表の時期

※公表日を可能な範囲で特定し、記載する。

3. 公表の方法

※著作物等を掲載する媒体や、公表する会議名等を記載する。

4. 公表する著作物等の概要

※著作物等の内容を簡潔に記載した上で、公表する著作物等を添付すること。

5. 公表の理由

※公表の目的等を記載する。

以 上

・文中の○は数字、×は文字を示す。

(登録例)

令和 年 月 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

令和元年度原子力施設等防災対策等委託費
(アーク放電に関わる電気火災モデル構築) 事業について

令和 年 月 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 ○○

電話 ○○

FAX ○○

Mail ○○

担当者名 ○○