

2021 年 10 月 20 日

## ユニットテーマ提案書

- **ユニットテーマ：** 地球を取り巻くエネルギー循環の劇的変容の体系化 I ・シミュレーション  
Drastic Changes in Energy Flows surrounding the Earth I (Simulations)
- **提案者（氏名・所属）：** 長谷川裕記・核融合科学研究所、石黒静児・核融合科学研究所

### “核融合研は、何処から来て、何処へ行くのか”（位置づけ・テーマ概要・自己評価）

本研究所は、創設時において、大型ヘリカル装置（LHD）を用いた実験研究とともに、理論・シミュレーション研究により、自由な発想に基づき広く核融合に関する研究を総合的に推進することを謳い、その研究活動を開始しました。この LHD を超伝導で運転する目的はほぼ達成され、超伝導 LHD 研究がまさに完遂されようとするいまこのとき、これを常伝導化し、自由な発想による研究を開始することは非常に大切なことであると考えます。それと同時に、その発展途上において中断と言っても過言ではない状況に置かれている理論・シミュレーションによる自由な発想に基づく核融合の学術研究を再起させることもまた、大変重要です。

本研究所に設置されていた理論・シミュレーション研究センターは、創設前のプラズマ研究（磁気圏サブストームやオーロラ現象、太陽フレア、スフェロマック生成、RFP 形成、トカマク崩壊など）、そして、MHD プラズマの基本的な非線形非平衡動的プロセスとしての外部駆動磁気リコネクションを世界に先駆けて提唱した経験をもとにして、創設時に、自由な発想で広く核融合に関する総合的なシミュレーション研究を開始しました。その時の哲学的な指針は、“自然界においては、全てのシステムは開いており、外部からのエネルギーの流入によって活動し、そのエネルギーの循環においてエネルギーの澁み点（特異点）が発生し、そこにエネルギーの異常な蓄積が生じ、遂にはエネルギーの爆発的な解放が発生し、新しいフェーズへと転換する”というものでした。

この指針に基づき、各種実験棟とともに計算機実験棟（シミュレーションラボ）（現シミュレーション科学研究棟）が整備され、大型シミュレーション研究用解析装置や巨大仮想現実装置を導入し、核融合プラズマ研究を基軸として、固体物性や流体物理の専門家をリクルートし、通信・放送機構（現情報通信研究機構）からの競争的資金の獲得、早稲田大学の脳科学者や慶応義塾大学の新薬開発研究者などとの共同研究の推進など、幅広くその学術研究を展開してきました。ただ、惜しむべくも、ここ 15 年以上は、その活動の多くが LHD 研究に注がれていたこともあり、このような幅広い学術研究は停滞していました。そして、今回、本研究所は“何処へ行くのか”を反芻し、我々は次のような結論に達しました。

ここで、我々地球上の人類が存在し、活動しているのは、地上では太陽からのエネルギー、そして、地下では超新星の爆発により生まれた放射性元素の放射熱と、ともに天体の核融合反応に依拠していることを思い起こします。つまり、我々を取り巻くすべての活動は本研究所の対象となりうることを示しています。核融合炉の開発は、その天体の核融合反応を人類の力で創り出そうという野心的課題の一つと言えます。このことに鑑み、核融合炉実現に寄与する学術研究とともに、地球を取り巻くエネルギーの循環を解き明かす学術研究を、本研究所の今回の改革の柱にすべきであると提案します。そこで、その目的に向けて、実現可能であると考えられる 2 つの研究テーマを取り上げました。本提

2ページ以内で記述し、10.5pt・行間1行を使用してください。青字の注意書きは削除してください。

案書では、「エネルギー循環の劇的変容を無撞着に記述するシミュレーション技法の開発と研究」について概要を記します。

**(研究内容/方法の概要・自己評価)** 上述した自然界の性質を鑑み、マクロ系における急激なエネルギー解放（爆発）現象をシミュレーションする方法論として提唱されたのがマクロ-マイクロ連結階層法（Macro-Micro Interlocked (MMI) 法）です。本研究所では、すでに、これを太陽風—磁気圏—電離層結合系に応用し、大域的なアルフベン不安定性の発生、その成長に基づく磁力線上の一点でのマイクロダブルレイヤの形成、それによるオーロラアークの発光、アークの動きと変形等の再現に成功しました。その経験に基づいて、地球を取り巻くエネルギー循環に関わる様々な劇的変容現象を対象に、MMI 法を基盤とした斬新なシミュレーションアルゴリズムを開発して、その機構解明を行います。このような一連の研究を通じてマクロな系に現れる劇的変容過程の体系化を目指します。そして、一般的な自然界の劇的変容を予測できる方法論に昇華させることを目指します。当面の具体的研究課題として、以下の4つを取り上げます。

(1) 磁気圏前面での太陽風の磁気圏への準静的な流入、及び、尾部での磁気圏サブストームの劇的変容現象を対象として、駆動磁気リコネクションに関わる各々の状況に応じた微視的物理過程と大域的な MHD モデルを結びつけた自己無撞着なアルゴリズムを開発し、その全容を解明します。

(2) マントル対流とプレートの衝突に基づく地震発生のメカニズムを念頭に置き、流体の表面にプレートを模擬した薄い二つの固体層を配置したシステムを設定し、流体層に2つ目玉の対流現象を発生させ、上部の固体層を衝突させることにより、その接触面において対流（マクロ）エネルギーの蓄積と接触面における固体の崩壊（マイクロ）が発生する過程を自己無撞着にシミュレーションするアルゴリズムを開発し、マクロエネルギーの蓄積・解放過程の解明を行います。

(3) 本研究所では、地球内部核内の流体鉄の運動に伴う電磁流体相互作用により発生する双極子磁場及びその極性の逆転現象を MHD シミュレーションにより導き出すことに成功しています。しかし、その逆転の機構は未解明です。逆転現象はマクロなエネルギーの集中によって生じた数値誤差による散逸が関与していると考えられます。その解明のため、逆転時の時々刻々の三次元的様相を VR 装置（CompleXcope）などの可視化装置を活用して詳細に吟味・分析し、そこから逆転を引き起こす物理マイクロ過程を突き止め、その知見を基に新たなアルゴリズムを開発し、地磁気逆転現象の自己無撞着な解明を行います。

(4) シミュレーション研究では、その基盤となる斬新な計算機アーキテクチャやデータ表現法の開拓が重要となります。本研究所の創設当時、大規模な“スパコン”ではなく、シミュレーション演算部とデータ記憶部の調和/連携を重視し開発した新しい記憶装置を搭載したシステムを調達し、本研究所をシミュレーション研究における世界的なリーダーの地位へと引き上げました。この経験に基づき、上記研究を飛躍的に進化させる高次元のアーキテクチャ（マクロ計算とマイクロ計算の特性を活かす最適アーキテクチャ）とデータ表現法（複雑・多様現象に最適な表現法）を開拓し、各ベンダーとの協力の下、世界を先導するシミュレーション研究システムを開発することを目指します。

なお、これらの課題の実施にあたっては、専門的な知識を有する研究者、及び、各ベンダーを国内外から広く募り、その研究を実施します。