

本論文は

世界経済評論 2024年9/10月号

(2024年9月発行)

掲載の記事です



世界経済評論

定期購読のご案内

年間購読料

1,320円×6冊=7,920円

6,600円

税込

17%

送料無料
OFF

富士山マガジンサービス限定特典

※通巻682号以降

定期購読
期間中

デジタル版バックナンバー読み放題!!



世界経済評論 定期購読



☎0120-223-223

[24時間・年中無休]

お支払い方法

Webでお申込みの場合はクレジットカード・銀行振込・コンビニ払いからお選びいただけます。
お電話でお申込みの場合は銀行振込・コンビニ払いのみとなります。

Fujisan.co.jp
雑誌のオンライン書店

核融合エネルギー研究開発の現状と産業化に向けた新たな展開



室賀 健夫

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所 特任教授

むろが たけお 1984年 東京大学大学院工学系研究科原子力工学専門課程博士課程修了(工学博士)、九州大学応用力学研究所助教授を経て1995年より核融合科学研究所教授、2016年より同副所長、2022年より現職。総合研究大学院大学名誉教授。専門は核融合炉材料、照射効果。

核融合エネルギーに関する報道記事を目にすることが多くなり、以前にも増して世間の注目を集めるようになってきた。核融合炉は原子炉（核分裂炉）と比べ、事故や放射性廃棄物のリスク、燃料資源の自由度の点で格段に優れ、二酸化炭素を排出しない将来の基幹エネルギー源の有力候補である。日本ではEUなどとともITER（国際熱核融合実験炉）を経て原型炉（通称 DEMO 炉）を目指す研究開発計画を進めているが、一方、近年英米を先駆としてさらに早期の実現を目指す「核融合スタートアップ」が次々と立ち上がり、日本でも同じ動きが加速している。また各国で核融合エネルギーの将来の市場を見据えた動きも活発化し、国際的な産業化競争の様相を呈している。これらの動きと連動し産業界の核融合エネルギーへの関心も高まり、核融合産業の構築を目指した協議会が発足し活動を開始した。本稿では、核融合炉についての概要説明ののち、研究開発の現状と将来の産業化を見据えた新しい動きを紹介し、日本のエネルギー事情やカーボンニュートラル、経済安全保障の視点を含めて将来を展望する。

I 核融合炉の概要¹⁾

現在実用化されている核分裂炉では、ウラン(U)などの重い原子が分裂する反応（核分裂反応）により発生するエネルギーを用いるが、核融合炉では、軽い原子同士が結合する反応（核融合反応）により発生するエネルギーを利用する。「軽い原子」にはいくつかの選択肢があるが、最も反応しやすいのは共に水素の同位体である重水素(D)と三重水素(トリチウ

ム:T)の反応(D-T反応)であり、本稿ではこの反応を中心に説明を進める。図1に²³⁵Uの核分裂反応とD-T核融合反応を模式的に示す。図中の数値は反応の結果各粒子が持つ運動エネルギー(単位はメガ電子ボルト)であり、これらの運動エネルギーを熱エネルギーに変換し、冷却材により熱を取り出し、タービンにより発電を行う。この基本原理は核分裂炉、核融合炉共通である。

D-T反応を起こすのはそれほど難しくなく、トリチウムを含ませたターゲットに0.1メガ電

図1 核分裂反応と核融合反応の例

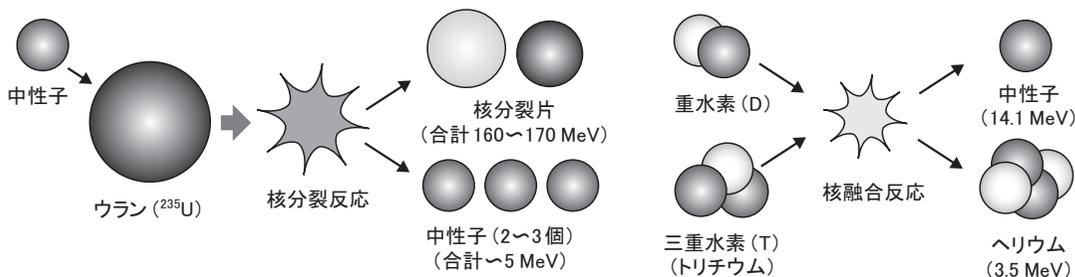
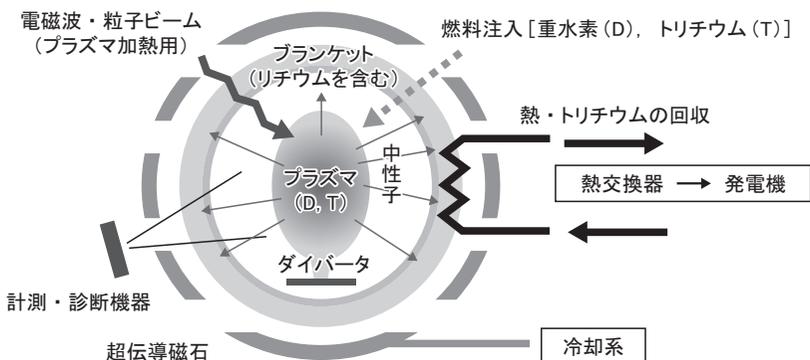


図2 磁場閉じ込め核融合炉の構造模式図



子ボルト程度の重水素イオンを照射すれば一定量の反応を起こすことができる。しかし発電プラントとして成立させるには、エネルギーをできるだけ消費せず多量のD-T反応を起こす必要がある。

固体、液体、気体を物質の三態と呼ぶが、さらに高温になると原子核とそれを取り巻く電子が分離した「プラズマ」状態となり、そこでは電荷を持った粒子が高速で飛び交っている。D-T反応を多量に起こすには、DとTを加熱しプラズマ化してお互いが高速で衝突する状態を作り出す必要がある。そのためには、高温で高密度のプラズマ状態にあるDとTを一定時間安定に保持することが必要であり、これは核融合炉が定常電源になるための必須の条件である。具体的には、強力な電磁石（後述する超伝

導磁石）を用いて磁力線の「籠」を作りプラズマを閉じ込め、そこに電流を流す、あるいは電磁波や粒子ビームを打ち込むことにより温度を上げD-T反応を起こし、さらにそれを持続させることが必要である。なお、このような方式を「磁場閉じ込め方式」と呼ぶのに対し、レーザーや粒子線により微小燃料ペレットを急速加熱・圧縮する「慣性閉じ込め方式」があるが、本稿では前者を中心に解説を進める。

もう一つの重要な課題は、反応の結果生じる中性子の持つ運動エネルギーを熱に変え発電するシステムを構築することである。この中核的な機器が「ブランケット」であり、プラズマの周囲に配置し、中性子を受けて発熱し、その熱を効率的に炉外へ排出する機能を有する。燃料であるトリチウムは自然界には殆ど存在しない

ので、ブランケットにリチウム（トリチウムと紛らわしいが、金属元素の一種）を含む材料を装填し、中性子と反応させることによりトリチウムを生成する。つまりブランケットは熱の発生、排出だけでなく、リチウムを用いて燃料トリチウムを生産する機能を持つ。以上の核融合炉の構造の模式図を図2に示す。

II 核融合炉の優れた点

ここまで核融合炉の基本原則を紹介したが、このような原理に起因する核融合炉の核分裂炉に比べて本質的に優れた点がある。一つは、核暴走事故が起こる可能性が無いことである。核融合反応を持続するには高温・高密度プラズマを保持しなければならず、燃料である重水素やトリチウムの供給を止める、あるいは電磁石の電源を切ることにより反応はすぐに停止する。ただし事故の懸念が全くないわけではなく、例えば除熱が必要なブランケットで何らかの原因で冷却機能が喪失すれば、D-T反応が止まっても核発熱は持続するのでブランケットの温度は徐々に上がり、溶融も起こりうる。これに対しては自然対流などにより安全に冷却する（受動安全性を有する）設計が進められている。

もう一つの優れた点は、核分裂炉では燃料の核分裂反応で生じる生成物（核分裂片）が長期間高レベルの放射能を有することにより、「高レベル放射性廃棄物」が生じるが、核融合炉では生じないことである。ただし中性子が材料に当たると誘導放射能が生じるので、はるかに低いレベルで一般に減衰も早い、放射性廃棄物は発生する。さらに、燃料のトリチウムは、福島の処理水放出で一躍有名になったが、微量ながら放射能を含むのでその管理が必要である。

このように核融合炉は、核分裂炉に比べて事故や放射性廃棄物のリスクに関する大きなメリットを有する。また、必要な燃料資源は重水素とトリチウム（トリチウム生成に用いる）であるが、これらは海水中に無尽蔵に存在する。重水素の海水からの回収はすでに工業化され、トリチウムの海水からの回収もすでに小規模ながら実証試験が行われている。このように資源の枯渇だけでなく、その偏在性によるリスクを回避できるのも、資源小国日本にとっては大きなメリットである。

III 核融合炉の技術課題

核融合炉に必要な技術開発について説明を始めると紙面がいくらあっても足りないので、ここでは、磁場閉じ込め核融合炉を中心に項目を挙げるに留める。

高温・高密度プラズマの安定閉じ込めに必要なのが、磁力線の籠を作る安定強磁場を発生させる大型電磁石（後述する超伝導磁石）の製作とその性能維持のための技術、プラズマの温度を上げるため高強度の電磁波や粒子ビームを発生させプラズマに連続的に導入する技術、燃料を効率的に注入する技術、プラズマの安定制御のためその状態を監視する計測・診断技術、などである。高温・高密度プラズマ、特に核融合反応を起こしているプラズマ（核燃焼プラズマ）、の挙動は極めて複雑で、それを予測して制御することは、物理と工学にまたがる挑戦的な課題である。

プラズマ粒子を磁力線の籠で閉じ込めても一定量は必ず周囲に漏出する。これらを集めて受けとめる機器を「ダイバータ」と呼ぶ。ダイバータは熱と粒子の負荷が一番厳しい機器であ

り、それらの負荷に耐える材料の開発と除熱構造の最適化が必要である。

ブランケットに関しては、トリチウムを効率よく生成し、熱とトリチウムを効率的に炉外に排出する材料の開発と構造の最適化が必要で、これには多くの選択肢がある。トリチウム生産を目的としたリチウムを含む材料（トリチウム増殖材）だけでも固体化合物、液体金属、熔融塩が検討されている。また、多くの設計で、トリチウム生成に必要な中性子を増やすためにベリリウムを含む材料（中性子増倍材）を入れている。熱を排出するため循環させる冷却材も水、ヘリウムガス、だけでなく上記リチウムを含む液体金属や熔融塩が兼用する案もあり、それぞれの組み合わせに特有の寸法変化や強度劣化、腐食などの課題がある。またブランケットは中性子の照射を長期間受けるので、大量の中性子照射に耐える構造材料を開発する必要がある。トリチウムの管理に関しては漏洩を極力抑えて、効率よく回収し貯蔵、輸送する技術が重要である。

IV 我が国の核融合研究開発計画

我が国の核融合研究開発計画は、現在でも1992年に原子力委員会が策定した「第三段階核融合研究開発基本計画」²⁾に沿っている。ここでは、磁場閉じ込め方式の中でも「トカマク方式」と呼ばれる形式を選択し、国際協力でフランスに建設中のITER（国際熱核融合実験炉）の試験により、高いエネルギー効率のD-T反応を一定時間持続できることを示すとともに、関連する工学技術を実証する。その後、経済的に見通しのある発電の実証を行う原型炉（通称 DEMO 炉）を経て実用化段階に至

るものである。

しかしながらITERの成果により即原型炉が建設できるわけではなく、ITERでは実証できない様々な技術の開発を同時に進める必要がある。その計画の一つがBA（幅広いアプローチ）活動³⁾であり、日欧協力により多岐にわたる研究開発が進められている。ITERを支援するとともにITERだけでは充分でないプラズマ閉じ込めと関連機器に関する研究開発を進めるのがJT-60SA計画であり、建設が完了し2023年10月からプラズマ実験が開始された。BA活動では、そのほか原型炉の設計及び関連した技術課題、数値シミュレーション、材料照射試験施設などの研究開発も進められている。ITERにおいては原型炉用ブランケットの試験を行うテストブランケットモジュール（TBM）計画があり、国内では現在その安全実証試験が進められている。

ITERのスケジュールについては最近まで2025年に初プラズマ、2035年に初D-T反応試験、と報じられていたが、つい先日、初プラズマを2034年まで延期することを検討している旨の発表があった。原型炉については日本の研究開発計画では「今世紀中葉」というやや曖昧なスケジュールが示されて来たが、後に述べる経済安全保障などの観点から前倒しが検討されている。

V 開発研究と学術研究

上記の研究開発計画のために、必要なデータベースを構築することを目標とする研究（いわゆる「開発研究」）は、国立研究開発法人量子エネルギー研究開発機構（QST）を中心に進められている。一方、核融合科学研究所（NIFS）

と大学は主に「学術研究」を担っている。学術研究は真理を明らかにするのが目標であり、研究開発計画に対しては主に「原理に基づき因果関係を明らかにする」アプローチで貢献する。研究開発計画を強靱なものとするには堅固な学術基盤を有することが必要で、特に安全性など社会的に信頼を得ることが必須な課題に関しては、学術に根差した説得力のある説明が求められる。

開発研究を進めるには様々な選択肢の中から特定の型式に集中する必要がある。開発研究では対象としない核融合エネルギーの持つ広い可能性を追求するのも学術研究の役割である。この中には、トカマク方式以外のプラズマ閉じ込め方式や先進的な核融合システムを目指した研究などがある。開発研究の一つの特徴はイノベーションを前提としないことであり、保守的な設計を基本とする。より先進的な核融合エネルギーシステムの実現は、挑戦的研究を支援し、イノベーションの指導原理を示す学術研究を基盤とすることにより可能になると言えよう。

筆者の所属する核融合科学研究所⁴⁾は、大学共同利用機関として1989年に発足した。日本において大学共同利用機関は、自然科学、人文科学を跨り現在17機関からなり、大学との共同研究により大学だけではできない大型施設利用研究などを進めている。その中で核融合分野の大学共同利用機関があることは、日本の科学技術研究体制の大きな特徴であり、核融合研究開発の基本姿勢を示すものである。

核融合科学研究所では、同じ磁場閉じ込めでもトカマク方式とは異なる「ヘリカル方式」のプラズマ実験装置（大型ヘリカル装置：LHD）による実験を進めている。ヘリカル方式の核融

合炉は定常運転性能に優れるという利点があり、LHDの実験によりその特性が明らかにされてきた。現在は学際的研究展開の一環として、LHDの超高温プラズマを安定に生成できる性能を生かし、プラズマの内部構造を計ることにより核融合炉に限らず宇宙プラズマなどにも共通する複雑現象の原理に迫る研究などを行っている。その他、プラズマ物理を中心とした広範な自然現象の理論・シミュレーション研究、先進核融合システムを目指した、高温超伝導（次に説明する）や先進的なブランケット、ダイバータ、プラズマ加熱・計測機器などに関する研究及びこれらの幅広い応用研究、なども大学などと協力して進めている。

VI 核融合技術と近未来社会

核融合炉を実現することがSDGsやカーボンニュートラルの実現に大きく貢献することは論を俟たないが、開発途上であっても得られた成果を他分野へ波及させることにより、技術イノベーションを通じて同様の貢献を果たすことも期待されている。すでに説明したように核融合技術は多岐にわたっているが、ここでは高温超伝導をその例として挙げる。

超伝導とは物質を冷却するとある温度（超伝導転移温度）で電気抵抗がゼロになる現象で、超伝導体で磁石を作ると電力をほとんど消費せずに強い磁場を発生でき、リニアモーターカーやMRIなどに応用されている。超伝導磁石の使用は、磁場閉じ込め方式の大型実験装置及び将来の核融合炉において必須となっている。しかし従来の超伝導体は液体ヘリウム（マイナス269度）を用いて冷却する必要がある、この液体ヘリウムを生成するのに大きな電力を要す

る。またヘリウムの資源に限りがあり（数年前の「ヘリウム危機」は記憶に新しいところである）、これが従来の核融合炉概念のウィークポイントであった。これに対し高温超伝導体は超伝導転移温度が従来の超伝導体より高く、液体水素（マイナス 253 度）による冷却も可能で、消費電力低減及び資源確保の点から遥かに優位である。ただし、高温超伝導体は極めて脆いセラミックス製なので、特に大型磁石への適用には、成型加工及び強度の確保に技術的課題があり、核融合炉用大型磁石への適用を目指した研究開発が世界各国で進められている。

カーボンニュートラル社会の実現に向けては水素の広範な活用が不可欠と認識されている。水素の大量輸送、大量貯蔵のためには冷却・液化し、その利用の際には常温のガスに戻す。これでは冷却に要したエネルギー（冷熱）は利用されないことになり、水素社会実現への障壁となりうる。水素冷却による高温超伝導磁石は水素を冷却状態で使用するので、このエネルギーを直接利用することになる。従って水素冷却超伝導磁石及び関連した低温技術の開発は、水素社会実現を強力に後押しするものである。

なお、核融合炉に関しては発電だけでなく水素製造を同時に行うシステムの設計が可能であり、核融合炉によりカーボンフリー水素サプライチェーン（二酸化炭素を排出しないエネルギーで水素を製造し、輸送・供給・利用するサプライチェーン）の中核を形成できるとの期待もある。

核融合技術に関連して最近注目されているのが「ムーンショット型研究開発制度」である。この制度は、「我が国発の破壊的イノベーションの創出を目指し、従来技術の延長にない、よ

り大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発を推進する国の大型研究プログラム」であり、この 10 番目の目標として「フュージョンエネルギーの多面的な活用」（フュージョンエネルギーは核融合エネルギーと同義）が設定され⁵⁾、現在そのプロジェクトを推進するプログラムマネージャーの選考が行われている。本制度において、発電だけでなく多岐にわたる核融合エネルギーの利用も視野に置き、挑戦的な研究を支援することにより、核融合のみならず広く関連分野の技術開発に大きな変革をもたらすことが期待されている。

Ⅶ 核融合スタートアップについて

地球温暖化対策として温室効果ガスの排出を実質ゼロにするカーボンニュートラルを 2050 年までに実現することが、日本の基本政策として示されている。しかし前述の日本の核融合研究開発計画では、発電実証を行う原型炉の運転を今世紀中葉に予定し、商用発電はその先になるので、この基本政策に貢献できない。このような状況で近年、英米そして日本などで次々にいわゆる「核融合スタートアップ」が立ち上がり、著名投資家や巨大 IT 企業などから世界で累計はほぼ 1 兆円ともいわれる投資額を引き出している。核融合スタートアップにはそれぞれ特徴があり一概に言うことはできないが、多くのスタートアップで 2050 年よりずっと早い核融合発電を標榜している。例えば核融合スタートアップの最大手 Commonwealth Fusion Systems (CFS) 社は、先ほど説明した高温超伝導磁石の開発を強力に推進し、強磁場で小型の核融合炉の開発を加速させ、2030 年代初頭に商用炉の稼働を行う、との計画を示してい

る⁶⁾。

核融合技術を専門とする筆者からすると、このスケジュールは非現実的であるとも言えるが、「商用炉の稼働」の定義の違いと解釈される。小規模の発電の実証から核融合エネルギーの社会実装までの間には、現在の核融合スタートアップだけでは解決できない多くの課題がある。核融合スタートアップの示す加速計画の多くは、現在の核融合研究開発計画が順調に進むことを前提としている。

スタートアップに共通の特徴は「リスクを背負う」ということ、つまり投資家の理解を得ることによりハイリスク・ハイリターンオプションを進めることができることである。この取り組みは、先ほど示した学術研究の先進的なシステムを目指す方向性と通ずるものがある。開発研究は国家予算を集中的に投じて進めるのでいわば「失敗が許されない」計画となり、保守的な目標設定とスケジュールリングが行われる。スタートアップの目指す概念や方式には学術研究のそれらと重なるものもあり、それぞれに特有のアプローチを生かし協力することにより、核融合研究開発にイノベーションを創出することが期待される。このようなスタートアップをはじめとする産業界との協力を推進する組織が、大学など学術研究機関に急速に整備されつつある。核融合科学研究所でも2024年3月に核融合スタートアップである株式会社 Helical Fusion との協力で産学官連携研究部門「HF 共同研究グループ」を設置し、ヘリカル方式の核融合炉の実現に向けた研究開発協力を開始した。

日本における最近の動きとして特筆されるのは、中小企業の研究開発を促進し社会実装を通じてイノベーションを創出する制度（SBIR 制

度）において2023年に核融合分野の公募が行われ、日本の核融合スタートアップからの高温超伝導、リチウムとベリリウムの確保、革新的ブランケット、の提案が採択されたことである⁷⁾。

VIII 核融合エネルギーの産業化と経済安全保障

2023年4月に、内閣府に設置された「統合イノベーション戦略推進会議」から「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」という報告が公表された⁸⁾。ここでは、ITER計画/BA活動の推進に加え、核融合エネルギーの実用化に向けて必要な技術獲得を進め、サプライチェーンを構成する産業を構築することの重要性が謳われている。米英中などにおいて、核融合エネルギーの産業化を目指した国家戦略を策定し、来るべき核融合エネルギーの利用段階において市場競争を有利に進めることを目指した政策が進められていることがこの背景にある。日本はこれまでITER計画/BA活動などで築いた技術基盤をはじめ、学術基盤、人的資源、ものづくり産業の信頼性などで諸外国をリードしてきたが、このままではこれらが将来の産業化競争に生かされないという危機意識が高まっている。従ってこの報告は、核融合エネルギーに関する技術安全保障を基盤とした経済安全保障の確保、という視点からの戦略提言と見ることができる。これに関連し、2024年4月に日米間で「フュージョンエネルギーの実証と商業化を加速する戦略的パートナーシップに関する共同声明」が発表され、研究開発施設の共用、人材育成、法整備のありかたの検討など広範囲にわたる協力が強化されることとなっ

た⁹⁾。本パートナーシップは核融合エネルギーの早期実用化と産業化を両国の協力により主導することを目指すものである。

このような政府の方針とスタートアップの興隆を契機として産業界の核融合への関心が高まり、2024年3月に核融合産業の育成・構築を目標とした「フュージョンエネルギー産業協議会(J-Fusion)」が発足し、活動を開始した¹⁰⁾。これは、官学主体の核融合研究開発に産業界が協力するというこれまでのスキームとは異なる、新しい産学官の協力・推進体制の発足を意味している。

おわりに

エネルギー政策として化石エネルギーを再生可能エネルギーに転換していくことの意義は論を俟たないが、発電量が大きく変動する再生可能エネルギー単独で安定した基幹電源の役割を果たすことは困難である。また、急速な科学技術の進歩、特にIT・デジタル化は電力消費の大幅な増大をもたらす。すなわち社会のDX

化は、よほどの省電力が実現しない限り、新たな大規模安定電源の導入が前提となっている。このこととカーボンニュートラルをどう両立させるかが将来のエネルギー問題に関する中心的な課題である。本稿では核融合エネルギーを取り巻く最近の変化をいくつかの視点で解説してきたが、最後に、二酸化炭素を排出しない将来のベースロード電源としての核融合炉の意義と必要性を再度強調したい。

[注]

- 1) 核融合炉及び関連する事柄を包括的に説明するサイトとして、文部科学省のサイトを紹介します。https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/ これは多くの大学、研究機関の協力で作られたサイトで、関連したアウトリーチ活動を含めて文部科学省内で「萩生田大臣賞」を受賞した優れモノである。
- 2) <https://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho10/siryu2104.htm>
- 3) <https://www.qst.go.jp/site/ba/list132.html>
- 4) <https://www.nifs.ac.jp/>
- 5) <https://www8.cao.go.jp/cstp//moonshot/sub10.html>
- 6) <https://cfs.energy/news-and-media/commonwealth-fusion-systems-closes-1-8-billion-series-b-round>
- 7) <https://www.teitanso.or.jp/sbir-monka-hojo/kakuyugo/>
- 8) <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index.html>
- 9) https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/1422811_00009.htm
- 10) <https://jfusion.jp/>

一般財団法人 国際貿易投資研究所の調査研究報告書 「調査研究シリーズ」のご案内

一般財団法人 国際貿易投資研究所の報告書の全文をダウンロードすることができます。(https://www.iti.or.jp/)

TRADE AND INVESTMENT ACTIVITIES OF CHINA IN VIETNAM AND SOME RELATED ISSUES

ITI 調査研究シリーズ 155号, 2024年3月刊, 2023年度公益財団法人 JKA 補助事業

Tran Kim Hao PhD

(AThe Central Institute of Economic Management under The Ministry of Planning and Investment (MPI), Vietnam)

Nguyen Trong Hieu PhD

(The Institute of Business Studies and Development (INBUS) under Hanoi University of Business and Technology (HUBT) Vietnam)

Nguyen Phuong Thao MBA

(The Institute of Business Studies and Development (INBUS) under Hanoi University of Business and Technology (HUBT) Vietnam)

Expansion and Penetration: Influences of the Chinese actors in the Thai Economy in the Post-COVID 19 era

ITI 調査研究シリーズ 156号, 2024年3月刊, 2023年度公益財団法人 JKA 補助事業

Trin Aiyara

(Assistant Professor, Faculty of Economics, Thammasat University)

一般財団法人 国際貿易投資研究所 (ITI)

TEL : 03(5148)2601 / FAX : 03(5148)2677

〒104-0045 東京都中央区築地1丁目4番5号 第37興和ビル3階

E-Mail : jimukyoku@iti.or.jp URL : https://iti.or.jp/