



# 米国ローレンス・リバモア国立研究所 National Ignition Facility における 自己点火実証

藤岡 慎介

大阪大学 レーザー科学研究所 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-6)

## Ignition Achieved at National Ignition Facility on Lawrence Livermore National Laboratories

Shinsuke FUJIOKA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received January 29, 2023)

### 1. はじめに

核融合反応を用いれば二酸化炭素と高レベル放射性廃棄物を出さずに、重水素と三重水素という水素の同位体からエネルギーを生み出すことが可能である。核融合は究極のエネルギー源として、近年改めて、産官から注目を集めている。米国を中心に、核融合エネルギー開発を掲げる企業が驚愕の規模の資金調達に成功している。米国エネルギー省 (Department of Energy: DOE) の Fusion Energy Science (FES) の予算規模は 2012 年から 2021 年の間、0.5 億米ドル付近で微増に留まるのに対し、民間資金の規模は指数関数的な増加をみせており、2021 年には FES の約 5 倍の 4000 億円相当に達している。国内でも既に三社が核融合エネルギー分野で資金調達に成功するなど活発である<sup>1)</sup>。

核融合エネルギーが改めて注目されている背景には、気候変動抑止のためのゼロカーボン・クリーンエネルギー、安定的なエネルギー供給という社会的要請に加えて、核融合反応によるエネルギー増幅が実証される段階に到達したことがあげられる。国際熱核融合炉 ITER の建設が着実に進んでいることが原動力の一つであることは間違いないが、2022 年 12 月の米国ローレンス・リバモア国立研究所の National Ignition Facility (NIF) での点火実証は極めて時宜を得た成果であると感じている。国内では内閣府の核融合戦略有識者会議で核融合原型炉開発の加速が議論されている。米国のバイデン政権は 10 年以内の核融合商用化という極めて挑戦的な目標を掲げるなど意欲的である。DOE が主催したプレスリリースの場でも、新エネルギーに意欲的な DOE 長官が点火の成果と核融合エネルギー開発の関係について言及し、更に出席者との質疑が重ねて交わされたのが印象的であった。

### 2. レーザー核融合の原理

レーザー核融合が目指すのは、端的に言えば、実験室内に太陽を作ることである。太陽の中心圧力は 2400 億気圧であるが、レーザー核融合が目指すのもまさにこの圧力、場合によってはこれ以上の圧力である。太陽の場合は自重で圧力を発生させているが、レーザー核融合では高出力レーザーで作る人工の圧力を利用する。地上の核融合では、最も反応を起こしやすい重水素 (D) と三重水素 (T) の核融合反応が用いられる。D と T と核融合反応が起こる度に 17.6 MeV のエネルギーが生まれ、そのエネルギーは  $\alpha$  粒子と中性子の運動エネルギーとして放出される。

高出力レーザーを物体に集光照射すると、物体表面が急激に加熱されプラズマになる。このプラズマは高温かつ高密度で、単位体積当たりのエネルギー密度が大きいことから、高エネルギー密度プラズマと呼ばれる。この高エネルギー密度プラズマをエネルギー発生に用いるのがレーザー核融合である<sup>2)</sup>。

アブレーターと呼ばれるカプセルの内面に、DT 固体層を形成し、その中空部を飽和蒸気圧の DT 気体で満たしたものが、レーザー核融合で一般的な燃料形状である。NIF で用いられている燃料のアブレターの直径は約 2 mm、DT 固体層の厚みは約 100  $\mu\text{m}$  である。アブレーターとして High Density Carbon が使われている。アブレターの表面を加熱してプラズマ化し、外向きに噴出するプラズマの反作用によって、内面の DT 固体層を中心にに向けて圧縮するのが爆縮であり、レーザー核融合において最も重要な過程である。外向きのプラズマの噴出をアブレーションと呼び、アブレーションの反作用によって生じる圧力をアブレーション圧力と呼ぶ。

アブレーターにレーザーを直接照射して爆縮を行うのが直接照射方式<sup>3)</sup>である。直接照射では、レーザーの高い干渉性に起因する強度の空間的な非一様性によって、アブレーション圧力が非一様性になり、均一な爆縮が阻

害される。照射強度の非一様性を緩和するために研究されているのが間接照射方式<sup>4)</sup>である。間接照射方式では、ターゲットは金などの重金属で作られた円筒内に置かれている。円筒内面をレーザー加熱し、温度 300 eV (1 eV = 11600 °C) のオープンを作り、オープンの中を満たす熱放射 X 線でアブレターを加熱する。レーザーを熱放射 X 線に変換する円筒をホーラム (houlraum) と呼ぶ。

球殻状の DT 固体層を、レーザー又は X 線で駆動される多段の衝撃波でエントロピーの上昇を最小限に抑えながら圧縮をすると、DT 固体層は高密度になり主燃料部が形成される。それと同時に、爆縮する DT 固体層による断熱圧縮で DT 気体は高温になり点火部になる。点火部で核融合反応が始まり、核融合反応で生じた  $\alpha$  粒子が点火部及び周囲の主燃料部を加熱することで、核融合反応領域が広がり、膨大なエネルギーが放出される。この方式では、燃料球殻の中心に点火部が形成されるため中心点火方式と呼ばれる。中心点火の最大の障害は、高温低密度の点火部とそれを取り囲む低温高密度の主燃料部やアブレターが流体力学的不安定性によって混合し、点火部の温度が十分に上がらないことである。

間接照射方式では、干渉性のない熱放射でアブレターを加熱するため、非一様性の種の一つを除去し、かつ流体力学的不安定性の成長率を低減させることができる。NIF では、間接照射型の中心点火方式によるレーザー核融合の点火実証を目指した研究が行われている。

### 3. レーザー核融合における状態の定義

Table 1 にレーザー核融合の状態の定義を整理した。まず、2022 年 12 月のプレスリリースを主導した DOE によるレーザー核融合の点火 (Ignition) の定義は、核融合で発生したエネルギーが入力のレーザーエネルギーが等しい状態である。以後、この状態を「DOE 点火」と呼ぶ。DOE 点火は元来、科学的ブレイクイーブン (Scientific breakeven)、日本語では科学的損益分岐点と呼ばれる状

態<sup>5)</sup>と等しいが、2014 年頃に LLNL が別状態を科学的ブレイクイーブンと呼んだために混乱が生じている。このため、本解説では科学的ブレイクイーブンという用語は使用しない。この混乱については後述する。

レーザー核融合の炉心プラズマは、燃焼、自己点火、燃焼波伝播を経て、高利得に至る。 $\alpha$  粒子による DT プラズマの自己加熱率が DT プラズマにおけるエネルギー損失率 (具体的には輻射損失率、熱伝導損失率、膨脹損失率の総和) を上回る状態が燃焼である。つまり、燃焼とは DT プラズマの温度が  $\alpha$  粒子の加熱によって上昇する状態である。 $\alpha$  粒子による加熱率が増加し、外部からのエネルギー注入がなくとも、 $\alpha$  粒子加熱単体で核融合反応が持続する状態が自己点火である。自己点火とは、この後に続く燃焼波伝播の始点この自己点火と DOE 点火は一般に一致しない。燃焼波伝播とは、点火部を取り囲む冷たく高密度な主燃料部が  $\alpha$  粒子で加熱されることで、新たな領域が自己点火に至る状態である。Betti らはこれまでの点火の定義を整理しなおし、 $\alpha$  粒子加熱による核融合反応エネルギーの増大率を指標として、観測可能な自己点火を定義した。彼らの定義は、プラズマの状態に依存するため、詳細な数値計算が必要であるが、NIF で自己点火に相当する核融合エネルギーは 1.2 MJ と結論されている<sup>6)</sup>。この状態を DOE 点火と区別して「自己点火」と呼ぶ。上述の加熱率とエネルギー損失率のバランスは、1957 年の J. D. Lawson 博士の考察に基づくものであり、米国では Ignition by Lawson Criteria という呼び方をしている。自己点火又は Ignition by Lawson Criteria は 2021 年 8 月に達成された。以後、DOE 点火と自己点火のどちらでも正しい場合に象徴的な意味合いでのみ単に「点火」を使用する。

さて、レーザー核融合に興味を持つ方は 2022 年 12 月の点火達成のニュースを聞いて既視感を感じたと想像する。これはレーザー核融合の点火に自己点火と DOE 点火の二種類が存在するためである。報道では、自己点火と DOE 点火の明確な区別をしないので、自己点火を達

Table 1 レーザー核融合における Ignition, Burning, Burning wave propagation, High Gain の定義。ここで、括弧で括った部分は理解を助けるために著者が追加した部分である。

用語	定義	到達時を公表した論文
科学的ブレイクイーブン (LLNL 定義) Scientific Break-even (redefined by LLNL) /Unity Fuel Gain	核融合反応で発生したエネルギーが、核融合燃料及びホットスポットに付与されたエネルギーと等しい状態で、Unity Fuel Gain と呼ばれることもある。核融合コミュニティ内には、この状態を Scientific Breakeven と再定義したことに対する批判がある。	7)
燃焼 Burning	D-T 核融合反応で発生した $\alpha$ 粒子による加熱が、プラズマの放射エネルギー損失、熱伝導損失、膨脹損失の和と等しくなった状態。	11)
自己点火 Ignition by Lawson Criteria	D-T 核融合反応で発生した $\alpha$ 粒子による加熱のみで、核融合反応が持続しつづける状態。	15)
燃焼波伝播 Burning wave propagation	D-T 核融合反応で発生した $\alpha$ 粒子による加熱で、自己点火領域が拡大する状態。	到達済み、未発表
点火 (DOE) Ignition = Break even	D-T 核融合反応で発生したエネルギーが、レーザーエネルギーと等しくなった状態。	到達済み、未発表
工学的損益分岐点 (Engineering) Breakeven	D-T 核融合反応で発生したエネルギーが、核融合反応を起こすために注入した電力を含む全エネルギーと等しくなった状態	未到達
高利得 High gain	D-T 核融合反応で発生したエネルギーが、自立的なエネルギー発生システムの構築に必要な利得を達成した状態。100 以上の利得が必要とされる。	未到達

成した2021年8月と、DOE点火を達成した2022年12月の二度、点火のニュースが流れたのである。このような複雑さは、レーザー核融合において、炉心プラズマの状態が非定常かつ過渡的であるため、点火を目標にしながらも、点火を直接観測することが困難であることに起因する。

最も混乱している科学的ブレイクイーブン(Scientific breakeven)の定義に言及する。本来の科学的ブレイクイーブンはDOE点火と同じ状態を指す。しかし、2014年頃にLLNLが科学的ブレイクイーブンと定義し直したのは、核融合反応で発生したエネルギーがプラズマに付与されたエネルギーを上回る状態である。レーザーエネルギー1.9 MJに対して、核融合プラズマに付与されたエネルギーは約10 kJである。当時の核融合で発生したエネルギーは最大で17 kJであった<sup>7)</sup>ので、彼らの定義に従うと科学的ブレイクイーブンを達成したことになるが、元来の科学的ブレイクイーブンとはかけ離れた状態である。

何名かの新聞記者とお話している際に、自己点火と $Q=1$ の混同が見られたので、両者の違いについても言及しておきたい。この混同は専門家にも見られるので注意が必要である。 $Q$ 値とは、単位時間あたりの核融合エネルギー(出力パワー)と単位時間あたりの加熱エネルギー(加熱パワー)の比で定義される。 $Q=1$ の状態にあるプラズマは、臨界プラズマと呼ばれ、日本の磁場閉じ込め核融合装置であるJT-60で $Q=1$ に相当する臨界プラズマが1996年に達成された。ここで相当すると書いたのはJT-60では核融合出力が少ないDD燃料を用いていたため、 $Q$ 値の分子にDTに換算した計算値が使われているためである。NIFで達成された自己点火とは外部加熱なしで、 $\alpha$ 粒子加熱によって核融合反応が持続する状態、つまり分母は0でも核融合出力が生じるので、減速相において瞬間的に $Q=\infty$ を達成している。注意頂きたいのは、準定常的に核融合反応を起こす磁場閉じ込め核融合と非定常かつ過渡的なレーザー核融合の間で、 $Q$ 値だけを直接比較しても科学的な意味はないことである。レーザー核融合における自己点火( $Q=\infty$ )の達成は、磁場閉じ込め核融合と比較した性能の優位性を示さないことを強調しておく。

#### 4. NIFにおける点火実証への歩み

2009年にNIFが完成した後、2009年から2012年にかけてNational Ignition Campaign(NIC)が行われた<sup>4)</sup>。この間の核融合出力は3 kJ以下でありNICが目指していた点火とはかけ離れた状況であった。これには複数の原因がある。当時、ホーラム内面のプラズマの膨脹を抑制するためにホーラム内に希薄なガスが封入されていた。このガス中を高強度なレーザー光が伝搬すると、誘導ブリリアン散乱がおこり、レーザーからX線へのエネルギー変換効率が低くなっていた。DT固体層の圧力と衝撃波速度の関係、つまり状態方程式に不確定性が残っていた。また、先述の流体不安定性によって点火部と主燃

料部が混合していたことも原因である。ホーラム内に核融合燃料を保持するための薄い膜や、アブレーター内にDT燃料を導入するためのチューブが、流体力学的不安定性の種になっていた。

流体力学的不安定性の抑制に導入されたのがHigh Footと呼ばれるアプローチである。レーザー核融合ではエントロピーを上げることなくDT固体層を圧縮する必要があるため、弱い衝撃波から強い衝撃波を段階的に駆動してDT固体層を圧縮する必要がある。一方、エントロピーを上げるとは流体不安定性の抑制に繋がるのが昔から知られている<sup>8)</sup>。最初の衝撃波の強度を少し強くし、DT燃料層の外側のエントロピーを上げることで、流体力学的不安定性の成長を低減するのがHigh Footであり、基礎実験において、流体不安定性の抑制効果が確認されている<sup>9)</sup>。このアプローチにアブレターの改良を加えて、2017年8月に53 kJの核融合出力を得ている<sup>10)</sup>、この出力は爆縮するDT固体層のもつ運動エネルギーを核融合出力が上回ったことに相当する。

2021年2月に170 kJの核融合出力を得た<sup>11)</sup>。これは燃焼の達成である。ホーラムの赤道面付近に照射されるレーザーの一部は、ホーラムの上部及び下部で膨脹するプラズマによって遮蔽される。HYBRID-E<sup>12)</sup>というアプローチは、ホーラムの入口付近でレーザーとプラズマの相互作用を利用し、ホーラムの上部及び下部を照射するレーザー光からホーラムの赤道面を狙うレーザー光にエネルギーを移行することで、X線照射の均一性を向上させている。このようにレーザー・プラズマ相互作用を積極的に利用してレーザービーム間でエネルギーを受け渡すという手法<sup>13)</sup>は高度で画期的であり、聞いた当時、私は感動したのを覚えている。ホーラムの入口付近にポケットと呼ばれる溝を設け、上・下部のプラズマがレーザーを遮蔽する面積を減らしたのが、I-Raumというアプローチである。自己点火の成果はHYBRID-E及びI-Raumによる照射均一性の改善に加えて、使用したアブレターの品質が核融合出力に大きく影響する<sup>14)</sup>。アブレーター内に僅かな欠陥(ゴミや空隙)が存在すると、それらが流体力学的不安定性の原因となる。高品質なアブレーターを用意することが核融合出力の上昇には重要である。最高品質のアブレーターと核融合燃料が準備できた2021年8月は核融合出力が1.4 MJに達し、遂に自己点火が達成された<sup>15)</sup>。その後、自己点火の再現とDOE点火の達成を目指してショットが行われたが、最大でも0.7 MJの出力でやや足踏み状態が続いた。この原因は、自己点火達成時と同程度の高品質なアブレーターが製作できなかったためである。

高品質のアブレターの製作は非常に難しいことから、アブレターの品質が悪くてもDOE点火を達成するために導き出されたアプローチがレーザーエネルギーの増大である。NIFにおけるレーザーのエネルギーの増大については、2019年に一部のビームを使ってデモンストレーションされていた<sup>16)</sup>。NIFの出力をこれまでの1.9 MJから2.05 MJに上昇させた最初の実験は2022年9月に行われ、欠陥を多く含むアブレーターを使用した

のにもかわらず、1.2 MJ の核融合出力が得られた。これは NIF における二回目の 1 MJ 越え結果である。

NIF のレーザーエネルギーを上げるメリットは、二つある、一つはより厚いアブレターを使用できることである。厚いアブレターを使うことで、流体力学的不安定性への耐性が増加する。もう一つ、レーザーの照射時間を伸長することで、レーザー照射後に惰性で核融合燃料が爆縮を続ける状態(coasting)の時間を短くすることができることである。coasting 時間がある閾値を越えると急激に核融合出力が低下することが知られており、原因は点火部と燃料部の流体力学的不安定性による混合であると考えられている。一方、NIF のエネルギーを上げるデメリットは、ホーラム内がより多くのプラズマで満たされることである。その為、特に赤道面を照射するレーザービームがプラズマで遮蔽される割合が増える。先述の Hybrid-E によるエネルギー移譲を多くすることで、照射の一様性を確保しながら、より厚く、そしてより長時間、核融合燃料を爆縮したことで、今回の 3.05 MJ の出力が達成された。この実験において使用されたアブレターは最高品質のものではないとのことである。今後、品質の優れたアブレターが準備できれば、核融合出力は更に上昇すると期待される。

## 5. DOE 点火後の展開

核融合炉の実現には、エネルギー利得 100 程度の高利得の達成が必要である。今回のエネルギー利得は 1.5 であるから二桁の向上を目指さなければならない。混乱する科学的ブレイクイーブンの定義について説明する中で、NIF において当時核融合燃料に付与されたエネルギーは 10 kJ であると説明した。NIF のエネルギー 1.9 MJ と比べると、僅か 0.5% である。この効率の悪さは、NIF の採用する間接照射では、レーザーを一度熱放射 X 線に変えることに原因がある。直接照射方式のレーザー核融合の研究は高利得に向けて不可欠である。また、核融合燃料に付与されたエネルギーの中で、プラズマの加熱に使われる割合も 10% を下回る。中心点火における爆縮によるプラズマ加熱では、必ずアブレーションによるエネルギー損失が生じるためである。これを解決する方法が高速点火と呼ばれる方法である。高速点火では、爆縮によって生成された高密度プラズマを外部からのエネルギー注入によって瞬間的に加熱することで、中心点火を上回る加熱効率を目指している。日本では直接照射型の高速点火方式によるレーザー核融合の研究が、エネルギー利得 100 以上の高利得を目指して進められている。高速点火の研究については是非、2021 年 3 月のレーザー研究の特集記事「高速点火レーザー核融合の進展：点火・燃焼実証に向けて」をご覧ください。

最後に、何をもちいてブレイクイーブン、損益分岐点と呼ぶかは、核融合エネルギーと比較するエネルギーの定義次第である。例えば、レーザーの発生に使用した電気エネルギー (300 ~ 500 MJ) と比較すると全く損益分岐点は越えていないことになるが、これも公平な比較にはな

らない。NIF は 30 年以上昔のレーザー技術で作られており、エネルギー利用効率が極めて低く、また、除熱も不十分であるから運転頻度が極めて小さく、一日あたり数回の核融合反応しか起こせない。定常的なエネルギー発生には、レーザーパルスの繰り返し数を上昇させ、核融合反応を連続的に起こし、そのエネルギーを定常的に回収するシステムの開発が必要である。レーザーに関しては、冷却性に優れるセラミックレーザーがガラスレーザーに変わるものであり、効率的な励起光源である半導体レーザーがフラッシュランプに置き換わる、コヒーレント結合技術によって小さなレーザービームの集合で大きなエネルギーを得ることが可能になり、更に効率に優れた低温冷却のイットリビウム系レーザーによって、レーザーに必要な電気エネルギーは格段に小さくなる。核融合燃料の連続製造及び供給技術、レーザー照射技術等の開発は、まだ予備的な段階であり、今後、産官学の共同による研究・開発の加速が期待される。2022 年 12 月 13 日の記者会見では、米国の DOE 長官から、官民パートナーシップによる核融合パイロットプラントの設計や、大統領の持つ核融合エネルギーのビジョンを実現するための計画立案への言及があった。レーザー核融合に限らず、核融合エネルギーの実現は、極めて大規模で多様に富む最先端技術の集約が必要である。ゼロカーボン・クリーンエネルギーという究極目標に向けた研究開発が、プラズマ科学、原子核科学、材料科学、レーザー・光学、放射線科学、システム制御科学、情報科学、量子科学の飛躍的發展を促す起爆剤として期待されている。

## 最後に

本稿の執筆を依頼された時、お引き受けすべきかやや躊躇した。本成果に私が直接関わっていないというのが躊躇の理由である。本件に関して、メディアを含む多くの方からコンタクト頂けたのは、本ニュースの直前に私が関わった NIF での実験<sup>17)</sup>をプレスリリースしたことが要因であるが、私は今回の DOE 点火達成の実験には関わっていない。一方、核融合、プラズマ科学、レーザー科学分野においてエポックメイキングな本成果に対して、日本語による速報的かつ専門的な解説が無いというのは、専門家の一員として責任を果たしていないという思いもあり、お引き受けした。DOE 点火の発表は速報に過ぎず、その詳細はいずれの国際会議、学術雑誌でもほとんど公開されていないのが現状であり、本成果に対する科学的な検証にはもう少し時間が必要である。

## 謝 辞

本記事の執筆にあたり、資料を提供頂いた、LLNL の A. B. Zylstra 氏、A. Kritcher 氏、大阪大学の千徳 靖彦教授らに感謝いたします。又、点火と Q 値について議論頂いた、広島大学の城崎 知至教授、パデュー大学の砂原 淳客員准教授、光産業創成大学院大学の森 芳孝准教授、京都大学の本多 充教授、疇地 宏大阪大学名誉教

授に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) FIA: "The global fusion industry in 2022," 2022.
- 2) R. Betti and O. A. Hurricane: *Nat. Phys.* **12** (2016) 435.
- 3) R. S. Craxton, K. S. Anderson, T. R. Boehly, V. N. Goncharov, D. R. Harding, J. P. Knauer, R. L. McCrory, P. W. McKenty, D. D. Meyerhofer, J. F. Myatt, *et al.*: *Phys. Plasmas* **22** (2015).
- 4) J. D. Lindl, O. L. Landen, J. Edwards, E. I. Moses, J. Adams, P. A. Amendt, N. Antipa, P. A. Arnold, R. C. Ashabranner, L. J. Atherton, *et al.*: *Phys. Plasmas* **21** (2014).
- 5) H. G. Ahlstrom: *Appl. Opt.* **20** (1981) 1902.
- 6) A. R. Christopherson, R. Betti, and J. D. Lindl: *Phys. Rev. E* **99** (2019) 021201.
- 7) O. A. Hurricane, D. A. Callahan, D. T. Casey, P. M. Celliers, C. Cerjan, E. L. Dewald, T. R. Dittrich, T. Döppner, D. E. Hinkel, L. F. B. Hopkins, *et al.*: *Nature* **506** (2014) 343.
- 8) A. Casner, L. Masse, B. Delorme, D. Martinez, G. Huser, D. Galmiche, S. Liberatore, I. Igumenshchev, Olazabal-Loumé, M., Ph. Nicolai, *et al.*: *Phys. Plasmas* **21** (2014) 122702.
- 9) B. A. Remington, H.-S. Park, D. T. Casey, R. M. Cavallo, D. S. Clark, C. M. Huntington, D. H. Kalantar, C. C. Kuranz, A. R. Miles, S. R. Nagel, *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci.* **116** (2019) 18233.
- 10) S. Le Pape, L. F. B. Hopkins, L. Divol, A. Pak, E. L. Dewald, S. Bhandarkar, L. R. Bennedetti, T. Bunn, J. Biener, J. Crippen, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 245003.
- 11) A. B. Zylstra, O. A. Hurricane, D. A. Callahan, A. L. Kritcher, J. E. Ralph, H. F. Robey, J. S. Ross, C. V. Young, K. L. Baker, D. T. Casey, *et al.*: *Nature* **601** (2022) 542.
- 12) A. B. Zylstra, A. L. Kritcher, O. A. Hurricane, D. A. Callahan, K. Baker, T. Braun, D. T. Casey, D. Clark, K. Clark, T. Döppner, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **126** (2021) 25001.
- 13) J. D. Moody, P. Michel, L. Divol, R. L. Berger, E. Bond, D. K. Bradley, D. A. Callahan, E. L. Dewald, S. Dixit, M. J. Edwards, *et al.*: *Nat. Phys.* **8** (2012) 344.
- 14) M. Yates and D. Van Hulsteyn: *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 1702.
- 15) H. Abu-Shawareb, R. Acree, P. Adams, J. Adams, B. Addis, R. Aden, P. Adrian, B. B. Afeyan, M. Aggleton, L. Aghaian, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022) 075001.
- 16) J. M. Di Nicola, T. Bond, M. Bowers, L. Chang, M. Hermann, R. House, T. Lewis, K. Manes, G. Mennerat, B. Macgowan, *et al.*: *Nucl. Fusion* **59** (2019).
- 17) J. D. Moody, B. B. Pollock, H. Sio, D. J. Strozzi, D. D.-M. Ho, C. A. Walsh, G. E. Kemp, B. Lahmann, S. O. Kucheyev, B. Koziowski, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022) 195002.