

核融合工学部会セッション

社会受容性の更なる拡大を志向する核融合炉概念の検討

Innovative Fusion Reactor Concepts Aiming at Further Expansion of Social Acceptance

(2) 燃料製造のためのバイオマスハイブリッド核融合炉概念の検討

(2) Investigation of the Biomass-Fusion Hybrid Concept for Fuel Production

*小西哲之¹¹京都大学エネルギー理工学研究所

核融合エネルギーを用いて廃棄物バイオマスの吸熱反応により水素等の燃料を製造するバイオマスハイブリッド概念の意義を紹介する。核融合の実用化が期待される将来のエネルギー市場は現在と大きく異なる。本概念は核融合の市場性社会受容性の可能性を広げる一方、核融合炉のエネルギー収支要件を緩和する。本講演ではこの概念を軸に、エネルギーとしての核融合研究開発の意義そのものにも踏み込んだ議論を提起する。

キーワード： バイオマス、燃料製造、核融合エネルギー、社会受容性、エネルギー市場、地球環境問題

1. 緒言

本セッションは「社会受容性の更なる拡大を志向する核融合炉概念の検討」と題しており、「核融合研究者が作りたい」というより、「社会が必要とするエネルギー」の観点で研究開発の目標を再検討している。20世紀半ば高度成長期のエネルギー観ではもはや核融合の意義は説明できない。化石燃料は枯渇するかなり以前に人類はカーボンバジェットを使い切る。今世紀半ばに大規模グリッドはすでに低炭素電源で飽和する一方、成長市場は低炭素燃料と中小グリッドに移る。核融合はその未来型エネルギーシステムにおいてその意義を示さなければならない。

演者らは約12年前に核融合熱を用いて廃棄物バイオマスの吸熱反応により水素や石油代替燃料を製造するバイオマスハイブリッド概念を提唱した[1]。今般政府で検討された「核融合分野における研究開発計画」(案)の「大目標」にも実は「バイオマスからの燃料や化学品等の製造・利用技術の研究開発等にも取り組む」ことが第5期科学技術基本計画に対応して検討されている[2]。それに該当する具体的研究は国内外ともに本報告以外にはおそらく行われていない。最近提示された「原型炉研究開発の推進に向けて」でも、エネルギー市場環境の激変が指摘されている。本講演では、このバイオマスハイブリッド概念の持つ意義の考察をアップデートする。

2. バイオマスハイブリッドの基本概念

本概念で利用するのは $(C_6H_{10}O_5)_n/6 + n/6H_2O \rightarrow nH_2 + nCO - 136n \text{ [kJ]}$ の吸熱反応であり、熱力学的平衡により高温ほど効果的である。図1に示すように、実験的には700℃以上で進行し、900℃で約95%のセルロースのガス化が実証されている。この反応を核融合等の外部熱源で行った場合のエネルギー収支を図2に示す。廃棄物バイオマスを代表するセルロースから水素と一酸化炭素の混合ガスが得られ、さらにシフト反応により水素燃料に変換するが、核融合エネルギーをすべて吸熱で利用し、排熱しないようにバイオマスが本来持つ化学エネルギーも利用す

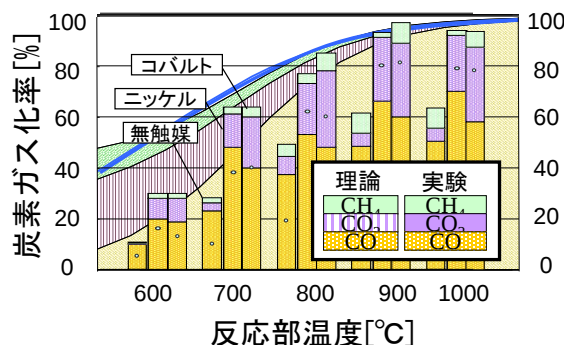


図1 セルロースの吸熱分解反応。

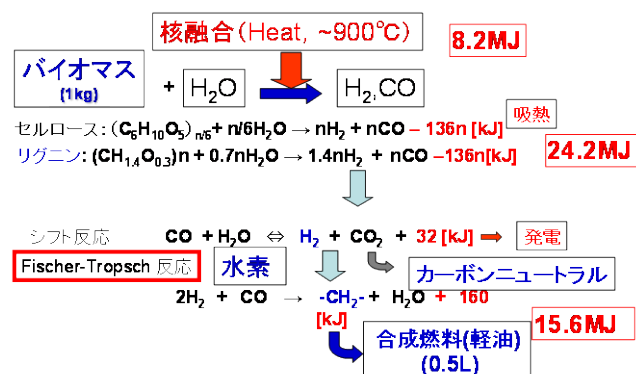


図2 核融合によるバイオ燃料のエネルギー収支。

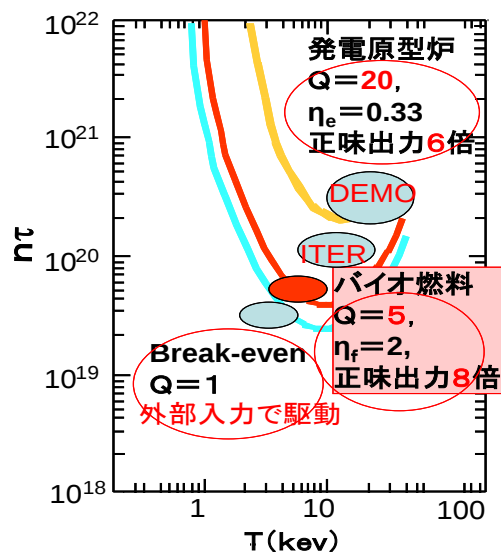


図3 バイオ燃料製造を考慮した核融合炉のエネルギー増倍。

るため、核融合による熱供給に対して 2.7 倍のエネルギー増倍となる。フィッシャートロプッシュ合成で軽油代替燃料を 1kg の原料から 0.5 リットル得ることもできるが、発熱反応を伴うので排熱を伴い、エネルギー増倍率は 2 倍である。いずれの場合も二酸化炭素を排出するがバイオマス起源であるためカーボンニュートラルとみなされ、石油代替の低炭素燃料として大きな市場可能性を持つ。

図 3 はローソン図上で本概念の特徴的な意義を示す。エネルギー利用効率が最大 270% に達するので、効率約 1/3 の熱機関を用いる発電炉で Q_{20} が正味エネルギー供給のために必要なのに対し、核融合装置本体でのエネルギー増倍率 Q への要求は約 5 で同等の正味出力が取り出し可能となる。ITER レベルのプラズマより低性能でもそのままエネルギープラントとなりうることになる。

3. バイオマスハイブリッドプラントの社会・市場適合性

本来このバイオマス燃料化概念は、従来の核融合炉設計で行われていた、現在の研究開発で可能な装置を構想する方向とは逆の、「社会が必要とするエネルギーに核融合が対応するとどうなるか?」という視点に立って検討されている。前節に示したように本概念は、結果的に従来考えられていた発電専用の原型炉よりプラズマへの要求は低く、ITER が建設可能であればエネルギー利用ができる。しかし本検討の中心的な課題は社会適合性にあり、社会に必要なエネルギー像を求めたとき核融合の早期実用化に有利な点があったにすぎない。一方、ベースロード発電が必ずしも核融合の市場化に適する保証はない。

将来社会において、二酸化炭素排出ゼロは必要条件であり核融合のメリットではない。エネルギー需要の約 3/4 は燃料にあり、電力ではない。一方他の先行する電源一再エネ、原子力、CCS 付石炭火力は負荷追従性がない一方、燃料供給能力は乏しい。要するに「クリーンエネルギー」後発の核融合は、負荷追従電力と低炭素燃料の供給は市場導入の可能性に大きく影響する。

先進国の電力需要は今後大きく伸びることはなく、電力グリッドは再エネ等の比率拡大に伴い調整力が悪化する。電力市場の自由化に伴い、分散化・双方向化も進む。図 4 に将来の電力システム概念を示す。大規模グリッドの下で、様々なローカル電源が存在し、電力の流れは一方方向ではない。核融合は大規模グリッドに接続しても、ローカル電源への燃料供給により負荷追従能力を持つ。

バイオマスハイブリッド概念は、廃棄物回収ロジスティクスと不可分であり特徴的なコスト構造を持つ。我が国には本概念に対応できる廃棄物（ゴミ）回収チェーンがすでに構築されているが、その回収範囲を考えると、1 GW 以下の核融合出力のプラントが妥当であり、それより大きいとサプライチェーンが構築困難になる。図 5 に、関西を想定したフローの分析を示す。可燃ごみは有償で回収されるので原料コストは負であり、輸送や貯蔵、最終廃棄物処分を考えても製品コストは負になりうる。農業や林業の廃棄物も利用可能であるが、廃棄物バイオマスの種類や輸送経路、発生パターンによりコストや供給量

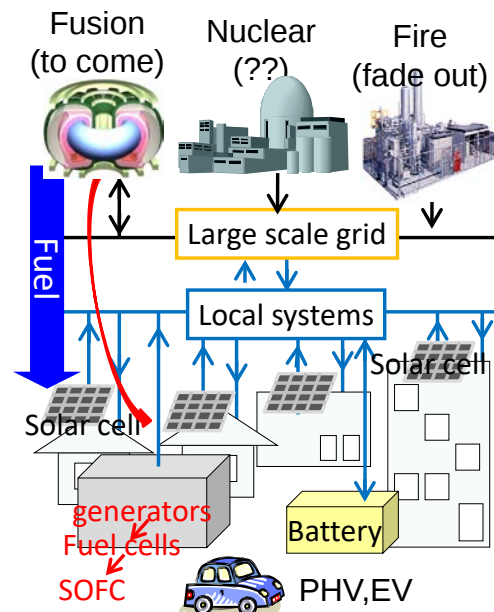


図 4 将来の電力システムと核融合。

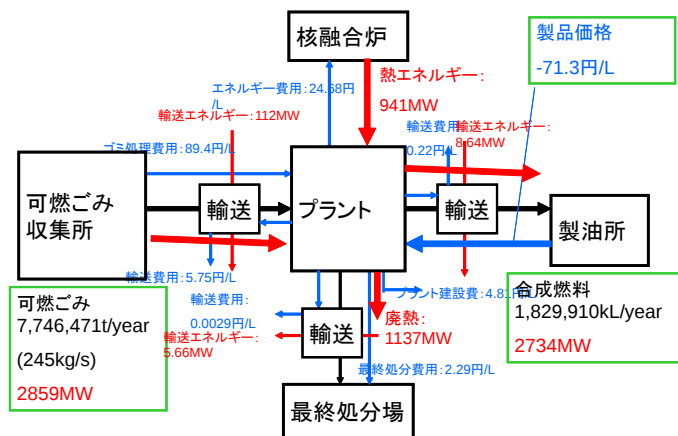


図 5 廃棄物バイオマス燃料化のフロー分析

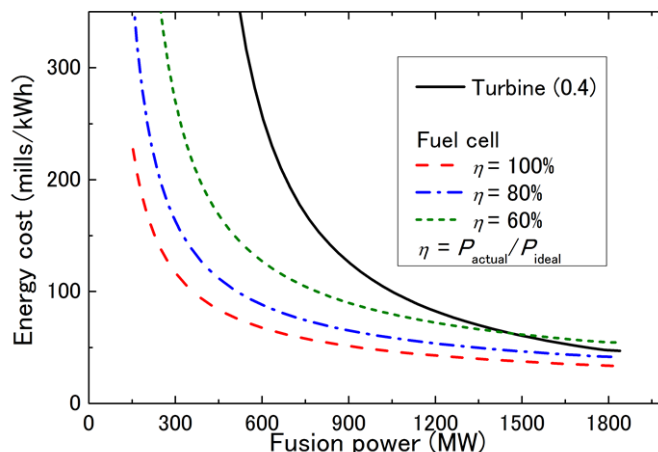


図 6 タービン発電と燃料電池発電のコスト比較

制限が大きく異なることは注意を要する。

バイオマスハイブリッドでは生成する燃料ガスを分散電源（燃料電池およびコジェネ）に供給することで、電力供給の枢要を担うことになる。自由化した電力市場では需要対応性で価格が決まる。発電プラントにおける核融合出力への発電方法のコスト感受性を図 6 に示す。タービンによる発電はスケールメリットが大きい、小出力では成立しがたい。燃料電池発電は発電効率が本来高い一方、スケールメリットは働きにくい。[3]

これに加えて、図 4 に示したようにローカル電源としてすでに燃料電池が普及していれば、プラント側で発電装置として設備する必要はなく、かつ消費者サイドではコジェネレーションによりエネルギー効率はさらに高くなる。このような形式での発電は、今後の自由化電力市場においてベースロードでの価格競争が厳しい一方、負荷追従電源は高単価でグリッドパリティを得られる。燃料製造は、電力市場に限っても大規模発電よりもメリットが大きい。

廃棄物バイオマス処理では核融合炉は発電より小出力に向くほか、パルス運転でもよく、また電力需要に合わせて起動できる。大規模なうね起動電力の大きな核融合は、今後の調整力現象を考えればグリッド適合性に難点があるがこの問題が緩和できる。ことに新規電力需要の増加が期待される途上国ではグリッドは小規模、未成熟であり、この概念は市場性を大きく拡大することになる。

「社会が必要とするエネルギー」を検討した結果がバイオマス燃料化であり、これは熱源の種類を問わない。高温ガス炉でも可能であり、むしろ核融合と同等以上に技術的には対応することができる。炉の規模でも適応性は高く、排除する理由はない。ただ将来市場、とくに途上国を想定したとき、核融合と高温ガス炉等の核分裂炉を比較すれば、核燃料サイクル（供給および廃棄物）と核拡散の制約差はありうる。

もう一つの核融合の利点の可能性は「隔離距離」である。核融合も核分裂も、設置される限りは公衆へ与える被曝は同等に規制される。想定外事象を含め、最大の公衆被曝（シーベルト・人）あるいは仮想健康被害は同じであり、違うとすれば放出核種がトリチウムとなる核融合はより需要地に近接できるかもしれない。バイオマスサプライチェーンからは、廃棄物発生源との近接性は先進国途上国共に利点になりえるし、特に交通機関が未成熟な場合では重要である。

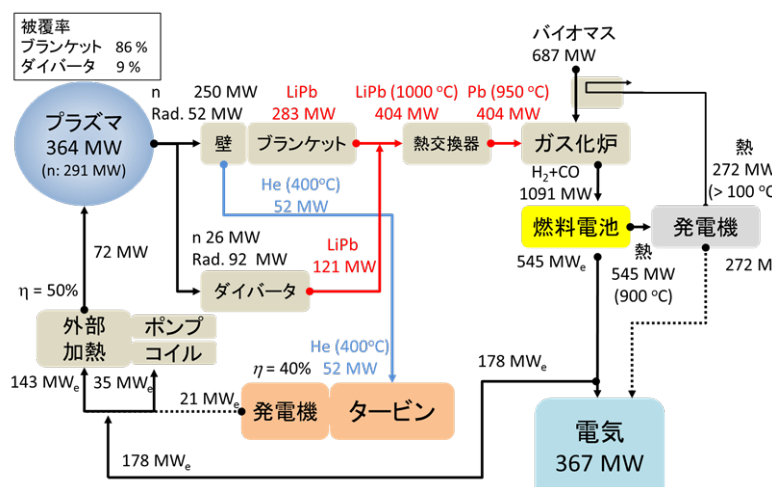


図 7 バイオマスハイブリッド核融合プラントのエネルギー収支

5. 核融合のテクノロジーに対して

前述のようにバイオマスハイブリッドは、核融合原型炉に対してエネルギー増倍率要求を大幅に軽減する。しかも、安定性や定常運転、需要への応答性、未着手のプラズマ燃焼制御の要件も改善される。この結果、バイオマスハイブリッド概念は（先行する核分裂ハイブリッドと同様に）核融合の実現可能性を定期的に早める効果を持つ。プラズマへの要求性能は、ITER が建設できた現時点でのプラズマ技術と大きく変わらず、要求熱出力が数百MW領域にあることから、ITER 類似装置はそのまま本概念で核融合エネルギーが実用を展望できることを意味する。少なくとも「ITER 実現後に原型炉」という路線にはない。

他方、工学課題は必ずしも容易とは限らず、少なくとも確立からは程遠い。最低 700°C、理想的に 900°C、という取り出し熱は原子力や火力プラントでは可能でも核融合では実証されていない。ブランケットは先進ブランケットの領域であり大きな課題となる。詳細は別途報告してあるが、演者らはブランケット熱媒体には LiPb を想定して R & D を行い、900°C での熱交換を含むプロセス技術も小規模で実証した。ブランケットは DCLL 類似構造であるが、SiC 断熱材に冷却パネル構造を用いれば DCLL レベルの技術で 900°C の熱取り出しは可能である。図 7 に 900°C を取り出せる LiPb ブランケットを用いたプラント概念とエネルギーフローを示す。主要なエネルギー利用は吸熱ガス化反応であるが、ダイバータや反応器の排熱は発電に利用する。このプラントはトカマクを想定しているが、プラズマに関しては閉じ込め方式を特定する必要はなく、ヘリカル、レーザー、他多くのプラズマに対しても、ブランケットが核反応の起こるプラズマと空間的に離れて設置でき、熱媒体を自由に選択できるという核融合炉に固有の特徴を有する限り、どの方式でも適用可能である。

化学プロセスでは高圧を要しないため、安全性の確保において高圧の圧縮性媒体を用いないという特徴的な利点をもつ。また排熱のための熱媒体を用いないため環境放出（特にトリチウム）は、大きく軽減される可能性がある。しかし一方製品燃料は消費材であり、そのトリチウム濃度管理が課題となる。もっとも核融合では軽水炉条件での熱交換や蒸気発生さえもがトリチウムを考えれば未着手に近い。

核融合の社会的受容性においては、バイオマスハイブリッドはエネルギー利用者すべてが潜在的トリチ

ウム発生源となる。核融合はいずれにしても定常トリチウム放出の問題を避けられないが、この点は立地点に放出源が存在する核融合発電や従来の原子力施設立地問題とは大きく異なる問題構造を持つ。

5. 将来展望—人類の持続可能性に向けて

電力市場は先進国においては自由化の大きな流れの中にあるが、そこではスポット取引で大きな価格変動がある一方、消費者サイドから見ればマージナルコストの低下が進んでいる。自由市場でなく国家政策が電力システムを構築する途上国でも発電コストの動向自体は実は同様であり、電力エネルギーそれ自体の価格は下落し、インフラや設備投資の比重が逡増している。さらに世界全体のGDPは成長を続けてもエネルギー原単位は逡減している。電力の限界費用が極小となる世界において、エネルギー技術の価値は、地球大気からの二酸化炭素除去能力で決まる。核融合の真の重要性はここにある。

バイオマスハイブリッド核融合のコンセプトは、植物の光合成により生成した有機物の燃料媒体への転換にその根幹があり、廃棄物バイオマスから可燃性物質（燃料）を取り出す一方、炭素を二酸化炭素だけではなくグラファイトの形で遊離、貯蔵することができる。この場合、投入エネルギーはバイオマスの炭化に主に用いられ、水素燃料は核融合出力から製造されるが、主要な製品は結局のところ大気中から植物により回収された二酸化炭素の固定隔離である。パリ協定で合意された気候変動対策では、発電における二酸化炭素炭素放出は今世紀後半以降ほとんどないことになっている。しかし二酸化炭素濃度の安定化にはバイオマスによる大気中からの回収とCCSを組み合わせた“BECS”によって他の放出源と合計でのゼロエミッションとしなければならない。

電力需要が21世紀後半に安定化したのちは、人類のエネルギー利用は限界費用ゼロに達し、その役割の大きな部分は二酸化炭素回収にその重点を移す。図8に、このシナリオ例を示す[4]。すべてのエネルギーセクターで二酸化炭素を回収し、発電のみならず熱利用、水素製造も加えて、植物からの回収分は他の回収できない燃焼等の放出分と相殺し、ネット排出量をゼロとすることが可能である。核融合に限らず、エネルギー利用のすべての技術は、バイオマス利用と二酸化炭素隔離に寄与することが求められる。再エネ、原子力がすでに飽和した人類の電力需要の太宗を担っても、核融合はバイオマスCCSの経路でさらにその役割の重要性を増すことになる。「遅れてきたクリーンエネルギー：核融合」の存在意義は、ここに存在する可能性がある。ことにCCSは、その適地や埋設容量に制約が予想されている。これに対し、CO₂還元に必要なエネルギーを核融合熱で供給し、木炭とすることで、常温常圧で大量の炭素を大気から隔離することができる。

人類が今世紀以降、持続可能な形で地球上で活動を持続するためには、二酸化炭素バランスを含めて循環型の物質エネルギーシステムを構築する必要がある。核融合は、単に発電技術の一つとしてではなく、バイオマス燃料化を通じた循環システムに人類が移行する方法となりうる技術なのである。

以上のような考察は、単なるプラント概念の提示ではなく、いくつかの点で「なぜ核融合を研究するのか？」という根源的設問に立ち戻る良い機会を与えている。このセッションでは、核融合の、そしてエネルギー研究開発の、原点を振り返るような議論を惹起するための素材の提示を意図している。

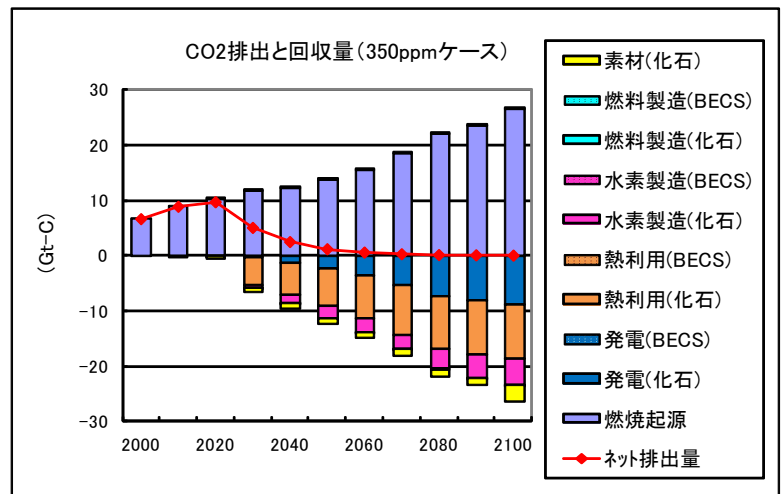


図8 バイオマスハイブリッドシステムを用いた人類活動のゼロエミッション化

参考文献

- [1] S.Konishi, “Potential Fusion Market for Hydrogen Production Under Environmental Constraints”, *Fus.Sci.Technol* **47**(5), 1205(2005).
- [2] http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/attach/1381826.htm 核融合科学技術委員会(第9回)資料2-1 核融合分野における研究開発計画(案)第2章 環境・エネルギーに関する課題への対応 2017.
- [3] K.Ibano et al., “Neutronics and pumping power analyses on the Tokamak reactor for the fusion-biomass hybrid concept”, *Fus.Sci.Technol* **88**(11), 2881(2013).
- [4] K.Tokimatsy et al., “Role of innovative technologies under the global zero emissions scenarios”, *Appl.Energy*, **162**(15)1483, 2016.

*Satoshi Konishi¹, ¹Kyoto University, Institute of Advanced Energy