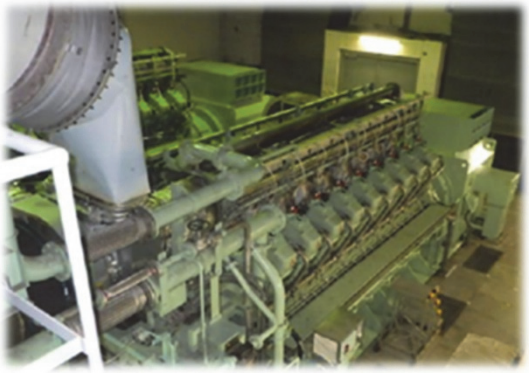
発電用ガスエンジン KU30GSI の CO_2 低減・水素利用技術

CO_2 Reduction and Hydrogen Utilization Technology for Power Generation Gas Engine KU30GSI



吉栖 博史[*1] Hiroshi Yoshizumi
鈴木 元[*2] Hajime Suzuki
高塚 正夫[*3] Masao Takatsuka
河合 一寛[*4] Kazuhiro Kawai
安藤 純之介[*5] Junnosuke Ando
野村 一敏[*6] Kazutoshi Nomura

三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社では，小規模な分散電源から事業用発電まで対応可能なガスエンジンコージェネレーションシステムを提供している。ガスエンジン発電設備の CO_2 排出係数を低減するシステムとして，冷却水を昇温し蒸気回収の熱源として活用する全蒸気回収ガスエンジン CGS では，長期間の運用実績が得られている。また，KU30GSI の単筒試験機にて水素混焼時の燃焼試験を行い，水素混焼率 50%までの実機性能や CO_2 排出係数の削減効果を確認した。今後，得られた水素利用技術を用いて水素混焼ガスエンジンの製品化を進めていく。

1. はじめに

脱炭素化に向けた世界的な潮流や国際的なエネルギー安全保障における緊張感の高まりを踏まえ，2025 年 2 月に“第 7 次エネルギー基本計画”が日本国政府により策定された。第 7 次エネルギー基本計画では，徹底した省エネルギーと非化石燃料の利用推進が求められている。

天然ガスは，化石燃料の中で CO_2 排出量が最も少なく，石油の代替エネルギーとして利用が進められ，水素などの非化石燃料への移行期においても重要な燃料として考えられている。ガスエンジンは，天然ガスや都市ガスをはじめ種々のガスを燃料としており，水素を利用した発電も可能である。また，ガスパイプラインは耐震性を備えており，エネルギー供給の強靭性を有するガスエンジン発電は，大規模災害時においても安定的に発電できるシステムとして期待されている。

このような背景の中，ガスエンジンは高い起動性能，負荷追従性を有し，排熱回収にもフレキシブルに対応できる利点から，コージェネレーションシステム（Combined Heat and Power plant 以下，CHP）をはじめ，様々なアプリケーションの幅広い出力範囲で利用されている。優れた発電効率を維持しながら，高い排ガス温度による効率の良い排熱回収で 80%以上の総合効率が達成されており，エネルギーソリューションの最適な選択の一つと考えられる。

三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社（以下，MHIET）では 315～1500kW をカバーする高速ガスエンジン GSR と発電効率を高め省スペースで 2000kW を出力できる GNB，3650～5750kW をカバーする中速ガスエンジン KU30GSI をラインナップし，小規模な分散電源や施設・

*1 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 次長 技術士（機械部門）
*2 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 主席技師 技術士（機械部門，総合技術監理部門）
*3 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 課長
*4 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 エナジー技術部 主席技師
*5 三菱重工業株式会社 総合研究所 知能化機械研究推進部 主席研究員
*6 三菱重工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部

工場等の CHP から，事業用発電まで対応している。図 1 に MHIET ガスエンジンの出力レンジと外観写真を示す。

MHIET では，ガスエンジンの発電効率の向上に加え，排熱利用によるエネルギーの有効利用に継続的に取り組んでいる。さらに，脱炭素社会に向け再生可能エネルギーの利用や水素を利用した発電についても技術的な取組みを開始している。

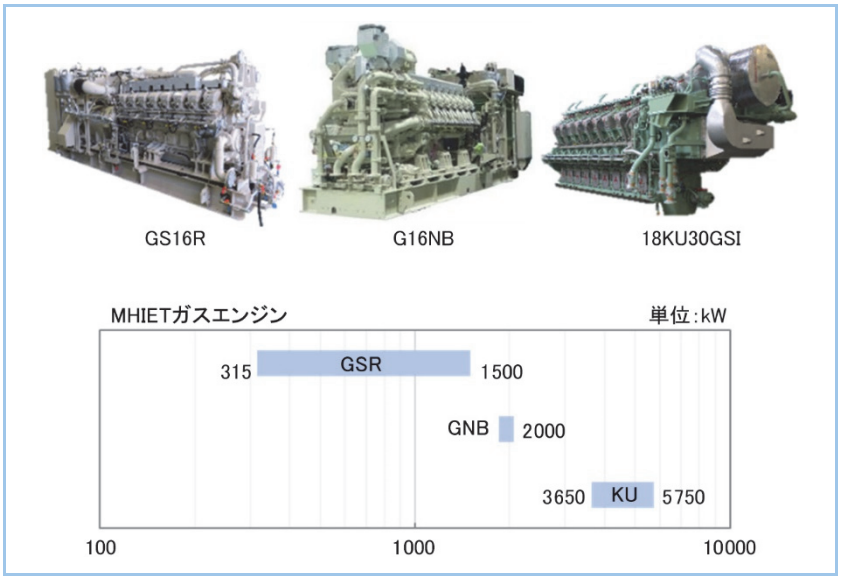


図1 MHIET ガスエンジンの出力レンジと外観

2. KU ガスエンジンの概要

MHIET の KU ガスエンジンシリーズは，1990 年に火花点火方式の KU30G を市場投入して以来，2001 年にマイクロパイロット着火方式の KU30GA，2009 年に火花点火方式を採用した KU30GSI をリリースし，経済性と信頼性を追求した開発を継続している。最新機種である KU30GSI シリーズは，総合効率を重視した KU30GSI と発電効率を重視した KU30GSI-PLUS をラインナップし，発電出力範囲 3650～5750kW をカバーしている[(1),(2)]。表 1 に KU30GSI シリーズの主要諸元を示す。

KU ガスエンジンシリーズにおける最長運転時間は 180000 時間に到達しており，フィールドでの全 KU シリーズエンジンの延べ運転時間は 1100 万時間に達している。部品の約 80%をシリーズエンジンと共通設計とすることで高い信頼性を確保し，豊富な運用と整備実績に基づいた製品とサービスを提供している。

表1 KU30GSI シリーズの主要諸元

形式		KU30GSI	KU30GSI-PLUS
シリンダ数		12 － 18	
ボア/ストローク	mm	300 × 380	
回転数	min^{-1}	720 / 750	
発電出力※	kW	3650 - 5750	
発電効率※	%	46.5	49.5
NOx(O_2=0%換算)	ppm	＜320	
重量	ton	40 - 60	

※:ISO3046 条件及び MHIET 推奨の標準ガスによる

3. ガスエンジン冷却水エネルギー利用技術

KU30GSI は発電効率を高めるとともに排ガス温度も高くすることで，発電と蒸気を合わせた総合効率で世界最高レベルの効率を実現している。

蒸気・温水の利用を考慮すると80%を超える総合効率が得られ，広くCHPで利用されている。エネルギーを有効に利用することは，使用するエネルギーを減らし，燃料費を抑制するとともにCO_2低減にも寄与する。一方，温水については，需要側の制約から年間を通して有効に利用できない場合もあり，自家発電設備のメリットを最大限活かせないケースがあった。そこで，エンジン冷却水の温度を沸点以上の 120℃まで高めることで熱源とし，発生した低圧蒸気を圧縮し，排ガスボイラ等で生成される蒸気に加えるシステムを4社*共同で開発した。この“全蒸気回収ガスエンジン CGS”は2015年に商品化し，18KU30GSI では蒸気発生量が約3.3ton/hから約5.1ton/hと1.5倍以上増加した。温水を除いた発電と蒸気の総合効率は，世界最高の70%以上の効率を達成している。全蒸気回収ガスエンジン CGS は，高い発電効率を維持したまま従来のガスエンジンCHPでは得られなかった熱電エネルギーバランスが得られ，蒸気発生量はコージェネ用ガスタービンの下限レベルと同等となる。

全蒸気回収ガスエンジン CGS は2018年よりフィールドでの運用を開始し，約7年間，定格連続運転を行い，運転時間は 50000 時間以上に達している。運用中，部品の異常摩耗や潤滑油消費量の増加はみられず，当初予定していたメンテナンスプログラムを変更することなく，安定した運用を継続している。図2に燃焼室内の状態を示す。

*東京ガス株式会社，三菱重工業株式会社，三浦工業株式会社，株式会社神戸製鋼所

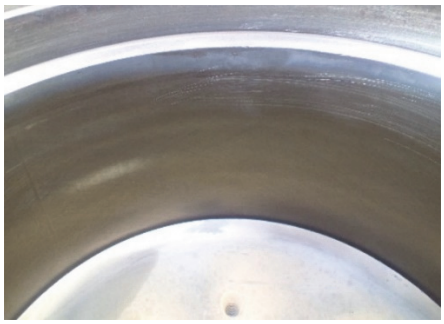


図2 全蒸気回収ガスエンジン CGS の燃焼室の状態

4. ガスエンジン水素利用技術

水素を発電用ガスエンジンで利用する上での技術的な課題の一つとして，水素の燃焼特性が挙げられる。水素は都市ガスに比べて可燃範囲が広く，燃焼速度が速く，最小点火エネルギーが小さいという特徴がある。そのため，エンジンにおいては，ノッキングや過早着火，バックファイアなどの異常燃焼が発生しやすくなる。CHP においてエネルギーを有効活用するためには，水素混焼時の発電出力及び発電効率を高く維持しつつ，排ガス温度も高いレベルを保持する必要がある。そこで，KU30GSI の単筒試験機にて都市ガス 13A 相当の燃料ガスに水素を混合し，燃焼特性への影響を把握するとともに機関性能への影響を確認した。

(1) 単筒試験機と試験内容

試験に用いた単筒試験機は，KU30GSI の生産機の燃焼室部品をそのまま使用している。表2に主要諸元を，図3に試験機の構成図を示す。試験では都市ガス 13A 相当の燃料ガスをベースとし，水素を体積割合で30～50%混合することで水素混焼試験を行った。

試験内容の一例として，水素混焼時の異常燃焼に対する影響を把握する目的で，エンジンの膨張比変更試験を実施した。ここで膨張比とは，上死点筒内容積に対する下死点筒内容積の比率のことである。表3に膨張比試験に関する試験ケースを示す。Case2 は，給気弁閉時期を遅ら

せることで，給気弁閉時期での筒内容積と上死点での筒内容積の比率である実圧縮比を Case1 と同等としたものである。

試験においては，膨張比に加え，空気過剰率や点火時期も変更し，安定した燃焼を実現できる仕様を選定した。

表2 単筒試験機諸元

シリンダ数	1
ボア［mm］	300
ストローク［mm］	380
行程容積［L］	26.9
回転数［min^{-1}］	750
燃焼方式	副室付リーンバーン 点火プラグ着火方式

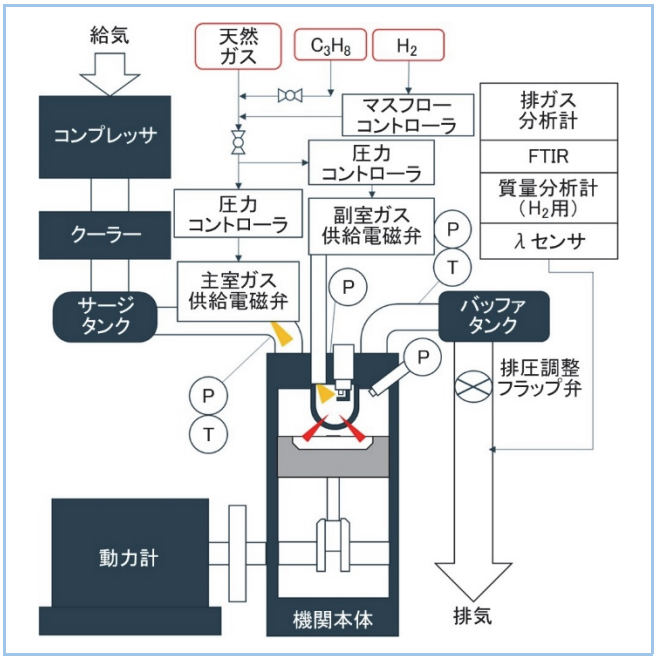


図3 単筒試験機の構成

表3 膨張比変更試験ケース

		Base	Case1	Case2
膨張比	―	Base	-0.5	-1.5
IVC※	―	Base	Base	14deg 遅角

＊各数値はベース仕様からの変化幅で記載
※:Intake Valve Close timing 給気弁閉時期

(2) 燃焼安定化に向けた適用技術

水素は前述した燃焼特性のために，都市ガスに比べて過早着火の発生リスクが高い。図 4 に過早着火発生時の筒内圧波形の一例を示す。図 4 では，実線で通常燃焼時の波形を，点線で過早着火発生時の波形を示す。正常時は，点火指令の後に副室内の燃焼が始まるが，過早着火発生時は点火指令の前に副室内の燃焼が始まり，その結果，主室内の圧力の最大値が上昇する。このように過早着火の発生は，筒内圧力の上昇につながるだけでなく，筒内温度や燃焼室の部材温度の上昇にもつながり，過早着火が連続的に発生するような事例では，燃焼室部品の損傷に至る場合もある。

表 3 で示した各ケースの定格負荷運転時の過早着火発生率を図 5 に示す。ベース設定では水素混焼率 50%の例では，燃料ガスに対する空気量の指標である空気過剰率を高く設定し，燃焼速度を緩慢にさせても過早着火は 4%を超える発生率であった。一方，膨張比を下げることで過早着火発生率を抑制でき，Case2 の膨張比まで低減することで，空気過剰率が低い燃料リッチ

側の条件でも過早着火の発生は抑制できることを確認した。過早着火発生のメカニズムは，筒内の油滴などが圧縮時に火種となり火炎伝播することで発生すると推定しており，本試験結果のとおり，膨張比の適正化を行うことで過早着火を抑制できる。

この他にも，ガス供給タイミングを適切な時期に制御する技術や，燃焼開始時期や筒内最高圧力を適切に制御する技術を適用することで，都市ガス運転時の定格出力を維持したまま，水素混焼率を 50%まで高めても安定した燃焼を実現できることを確認し，製品化に向けた設計を推進中である。

このような水素利用時の燃焼安定化技術は，全蒸気回収ガスエンジン CGS における水素混焼においても有効な技術である。全蒸気回収ガスエンジンの水素混焼対応のために，単筒試験機のエンジン冷却水系統を改造し，冷却水温度を 120℃まで高めた条件で水素混焼試験を実施した。冷却水温度が高くなることで燃焼室の壁面温度が上昇し，異常燃焼が発生しやすくなるが，燃焼安定化技術の適用により水素混焼運転が可能であることを確認し，全蒸気回収ガスエンジン CGS の水素混焼仕様についても製品化を進めていく予定である。

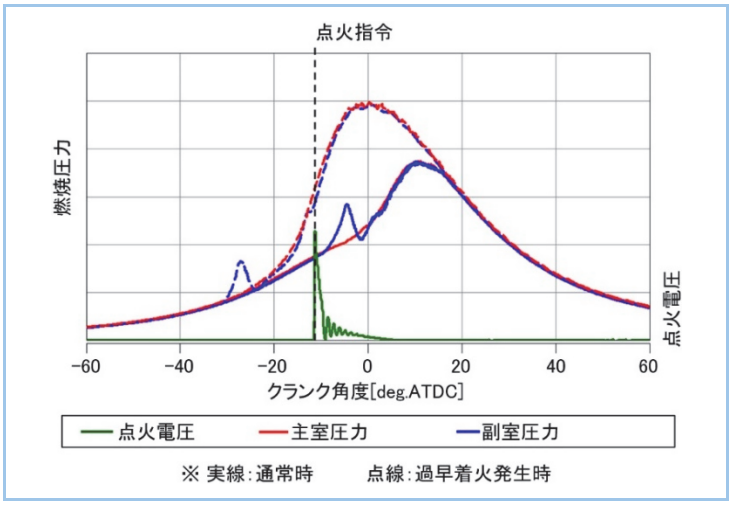


図4　過早着火発生時の筒内圧波形

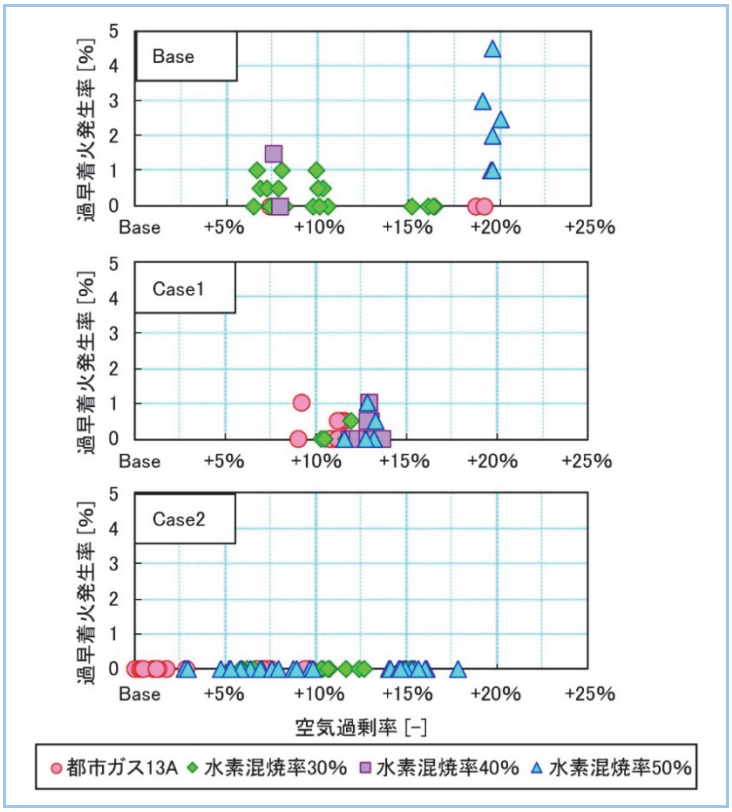


図5　各試験ケースでの過早着火発生率

(3) 実機性能と CO_2 排出係数

単筒試験機による燃焼試験から推定した水素混焼時の実機性能を図 6 に示す。筒内最高圧力を都市ガス 13A 使用時と同等とした場合，発電効率は混焼率によらず 0.5%pt 以内の低下に留まる。水素混焼時の安定燃焼のために空気過剰率を増加させており，過給機出口の排気温度は，水素混焼率 50%では都市ガス 13A 使用時に比べ約 30℃低下する見込みである。

排気温度の低下により排ガスから得られる蒸気量は低下することになるが，発電と蒸気を利用した際の CO_2 排出係数は水素混焼率を増加させる方が改善する。水素混焼時の CO_2 排出係数[3),(4)]の試算結果を図 7 に示す。EU では，世界に先駆けて環境的に持続可能な経済活動を体系的に整理した“EU タクソノミー”を設定しており，2030 年末までに建設が認められるガス火力発電事業の CO_2 直接排出量は 0.27kg-CO_2/kWh 未満としている[(5)]。都市ガス 13A のみを使用した場合は 0.32kg-CO_2/kWh レベルであるが，水素混焼率 50%で 0.26kg-CO_2/kWh レベルまで低減できる見込みが得られた。なお，全蒸気回収ガスエンジン CGS においては，水素混焼を行わない都市ガス 13A のみの場合で CO_2 排出係数は 0.28kg-CO_2/kWh レベルであり，水素混焼率 30%で 0.26kg-CO_2/kWh レベルまで低減できる見通しである。

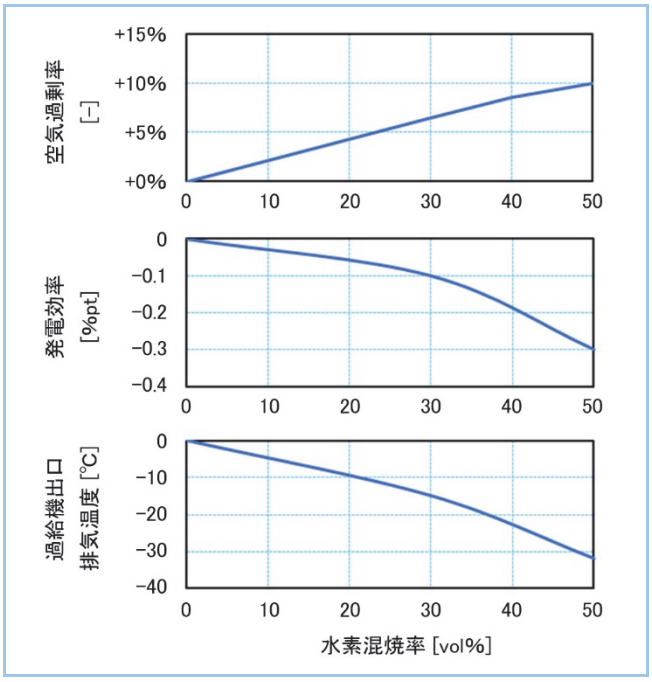


図6 水素混焼時の推定実機性能

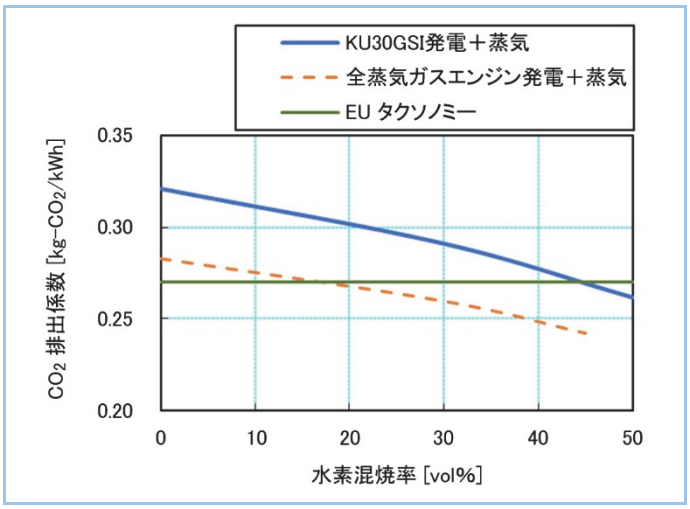


図7 水素混焼時の CO_2 排出係数

5. まとめ

全蒸気回収ガスエンジン CGS では，長期運転によるエンジン・システムの信頼性とエネルギーの有効利用を確認した。また，単筒試験機にて水素混焼率 50%までの燃焼試験を完了し，将来の水素利用の目途を得た。

世界規模での地球温暖化対策が課題となっている中，省エネルギーや未利用エネルギーの利用は有効な解決手段であるが，経済活動との両立は難しい側面もある。熱電利用の効率の高いガスエンジンコージェネレーションシステムは，こうした問題のソリューションとして提案できるものと考えている。

2050 年のカーボンニュートラル化に向けて，コストを抑えつつ円滑な脱炭素化への移行に対応できる技術確立が期待されている。ガスエンジンコージェネレーションシステムは，水素混焼，水素専焼，合成メタンのいずれにも対応していくことができるポテンシャルのあるシステムであり，将来のエネルギー需要を支えていく重要なシステムになるものと考えている。

MHIET ガスエンジンは，開発以来，社会とお客様のニーズに応えるべく技術開発を進めてきた。今後もガスエンジンの技術開発を進め，多様なお客様のニーズに対応するソリューションを提供していく。

参考文献

(1) 吉栖ほか，発電用ガスエンジン KU30GSI の発電効率向上と冷却水エネルギー利用技術，三菱重工技報 Vol.50 No.1 (2017)
(2) 吉栖ほか，The Field Experience of Mitsubishi Gas Engine，CIMAC Congress 2019，Vancouver ; Paper No.286
(3) 河合ほか，: Improvement technologies for efficiency and development for decarbonized society in Mitsubishi gas engines，CIMAC 2023，378 (2023)
(4) 吉栖ほか，ガスエンジンコージェネレーションシステムによる CO_2 削減，三菱重工技報，Vol.60 No.2 (2023)
(5) 電力中央研究所，SERC21005，EU における“タクソノミー”の動向，https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/21005dp.pdf