

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「アンモニア直接燃焼」

研究題目「船用ディーゼルエンジンおよび蒸気タービンリパワリングへの

アンモニア直接燃焼技術の適用に関する検討」

研究開発期間：平成 29 年 4 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

研究担当者：清水 明

所属研究機関：J F E エンジニアリング株式会社

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	1
3. 研究開発実施内容	2
3-1. 船用ディーゼルエンジンへの適用検討	2
3-2. 蒸気タービンリパワリングへの適用検討	5
3-3. まとめ	7
3-4. 今後の課題	8
4. 外部発表実績	9
5. 特許出願実績	9
6. 参考文献	9

図表一覧

図 J-1	アンモニア燃焼手法
図 J-2	シリンダヘッド 3D、噴射ノズル
図 J-3	空気過剰率変更による燃焼温度分布
図 J-4	$\lambda=2.0$ 、 1.7 での温度分布と筒内圧比較
図 J-5	空気過剰率変更による筒内圧比較
図 J-6	アンモニア層状度比較
図 J-7	アンモニア層状度による筒内圧、熱発生率比較
図 J-8	アンモニア層状度による燃焼温度比較
図 J-9	プレ噴射パターン
図 J-10	プレ噴射による噴霧分布および燃焼
図 J-11	プレ噴射有、無における筒内圧および熱発生率比較
図 J-12	プレ噴射パターン比較
図 J-13	プレ噴射による噴霧分布比較
図 J-14	プレ噴射による λ 分布および高温部分分布比較
図 J-15	プレ噴射による燃焼温度比較
図 J-16	プレ噴射による筒内圧および熱発生率比較
図 J-17	機械式燃料噴射装置（従来型）
図 J-18	電子制御コモンレール燃料噴射装置
図 J-19	コモンレール燃料噴射システム
図 J-20	コモンレール燃料噴射パターン
図 J-21	アンモニア供給装置
図 J-22	アンモニア供給装置

- 図 J-23 適用フローの検討結果
- 図 J-24 Case1 の適用フロー
- 図 J-25 Case2 の適用フロー
- 図 J-26 Case3 の適用フロー
- 図 J-27 各ケースの発電量比較
- 図 J-28 各ケースのアンモニア使用量比較
- 図 J-29 各ケースの排ガス量比較
- 図 J-30 アンモニア単価と収益増加額の関係

- 表 J-1 ディーゼル基本諸元（計算ベース）
- 表 J-2 空気過剰率変更による諸性能比較
- 表 J-3 アンモニア層状度変更による諸性能比較
- 表 J-4 プレ噴射変更による諸性能比較
- 表 J-5 アンモニア輸送船

1. 本研究の目的

「船用ディーゼルエンジンおよび蒸気タービンリパワリングへのアンモニア直接燃焼技術の適用に関する検討」

(1) 船用ディーゼルエンジンへの適用検討

船用ディーゼルエンジンへ熱量比 20%のアンモニアを投入し直接燃焼させ、排ガス特性、効率、未燃アンモニアへの影響度をシミュレーションにより検討し最適パラメータを見出し、計算結果に基づき、エンジンの試設計を行うことを目的とした。また、アンモニアタンカーの市場性調査を行い本研究の適用妥当性を確認することも目的とした。

(2) 蒸気タービンリパワリングへの適用検討

ボイラおよび蒸気タービンを有する廃棄物焼却プラント等において、ボイラで生成する発電用蒸気アンモニアの燃焼熱により加熱（リパワリング）し、発電量増加を目指す。リパワリング後のアンモニア燃焼排ガス顕熱の有効利用および脱硝処理について、廃棄物焼却プラント等の熱回収設備や排ガス処理設備との連携を検討し、適用可能性を評価することを目的とした。

2. 研究開発目標とマイルストーン

(1) 船用ディーゼルエンジンへの適用検討

シリンダ径 400mm クラス実機レベル 4 ストロークディーゼルエンジンの燃焼室をモデル化しアンモニア予混合気の燃焼シミュレーションを実施する。電子制御、高圧噴射を前提とした主ディーゼル燃料噴射のパターン変更、空気過剰率、予混合気の層状度を変更することにより、未燃アンモニアを低減させるパラメータを見出す。目標値としてはアンモニア混合率を熱量比 20%において燃焼効率 95%、排ガス処理装置出口でアンモニア 40ppm 以下となる条件見出す。

また同時に NO_x、N₂O、CO、THC、PM などの排ガス特性、およびエンジン効率を把握し、実機設計の指針を得る。また、シミュレーション結果を反映させた燃焼噴射系、アンモニア供給系試設計を行う。併せてアンモニアタンカーの実績と今後の本研究の適用につき市場調査を行う。

(2) 蒸気タービンリパワリングへの適用検討

現状、廃棄物焼却プラントにおいては、総発電能力に対して平均的に 30%程度の余力があるため、アンモニア燃焼装置を付設した廃棄物焼却プラントにおいて、この余力の半分程度を有効活用することを目標に検討を実施する。

1) 適用フローの検討

ボイラでの生成蒸気をリパワリングするアンモニア燃焼装置の選定およびリパワリング後のアンモニア燃焼排ガスの有効利用を考慮した適用フローを提案する。

2) 熱物質収支計算による適用検討と課題抽出

上記適用フローにつき、プロセスのガス流量、温度などを示す。また、実施に向けた課題を提示する。

3) コスト検討・市場性調査による実施可能性評価

本技術の経済性成立条件および市場性を提示する。

3. 研究実施内容

3-1. 船用ディーゼルエンジンへの適用検討

(1) 研究内容

アンモニアの直接燃焼技術はアンモニアタンカーでの船用エンジン用燃料として適用でき、EEDIにおける船舶からのCO₂削減義務(2020～:20%削減)に寄与すると考えられる。しかし、アンモニアはオクタン価約130、着火温度651℃と高く難燃性であるため完全燃焼が課題である。

本研究では、アンモニアをエンジン給気と混合させ予混合気を作り、主ディーゼル燃料を点火源として混合燃焼させる手法を解析的なアプローチで検討を行った。(図J-1)

具体的には、実機ベース(ボア×ストローク400×500mm、4ストローク)の燃焼室をモデル化し、燃焼シミュレーションを実施した。給気ポートへガス態でアンモニアを熱量比20%供給し主燃料油噴射によりアンモニア予混合気の燃焼を行うものとした。予混合気アンモニアの濃度分布、主燃料油噴射圧力、噴射パターン、空気過剰率をパラメーターに排ガス特性、効率、未燃アンモニアへの影響度を調査した。また計算結果を反映させた燃焼噴射系、アンモニア供給系試設計を行った。さらにアンモニア輸送船への本研究の適用について市場性の調査も行った。

(2) 研究結果

1) 燃焼シミュレーション

下に示す4要素をパラメーターとして変更し計算を実施。未燃アンモニアへの影響度および効率、各排ガス特性につき把握を行った。

- ・空気過剰率 : 混合気濃度の影響(燃焼温度の影響)
- ・混合気層状態 : 予混合アンモニア濃度分布の影響(高温燃焼域へのNH₃濃度分布影響)
- ・燃料油噴射時期 : 燃焼最高圧力の影響
- ・噴射パターン : プレ燃料油噴射による未燃アンモニアへの影響

シミュレーションのベースとなるディーゼル初期諸元を表J-1、図J-2に示す。

① 空気過剰率(λ)の影響

重油運転と同等の空気過剰率 $\lambda=3.2$ においてアンモニア20%を投入した場合、未燃アンモニアは37%と約60%の燃焼率に留まった。ここで $\lambda=2.5$ と過濃側に調整したケースにおいて計算を実施し、未燃アンモニア27%と約10%燃焼率が改善することを確認した。これは燃焼温度の高温化に伴い、アンモニア予混合気の燃焼範囲が広がったことによると考える。これより、空気過剰率を低減させ未燃アンモニア量の減少率、および諸性能の変化を把握するため $\lambda=3.2$ 、2.5、2.0、1.7における計算を行った。計算条件としては予混合気は均一濃度し、主油燃料噴射時期は9.5deg BTDCに固定した。(Case 4、5、5-1、5-2)

結果として、 $\lambda=2.0$ で未燃アンモニア21%とリッチ側に調整することにより未燃分が減少することが分かった。また効率、NO_xはともに $\lambda=2.0\sim 3.2$ の範囲では大きな変化は見られなかった。その他排ガス成分としてN₂Oは140~150ppm、PMは0.02~0.06g/kWhであった。

但し、 $\lambda=1.7$ までリッチ側に調整した場合、空気量不足、また圧縮圧力の低下により急激な燃焼遅れを生じ、燃焼最高圧力は2.5MPa低下し、それに伴い効率は7%悪化した。但し、燃焼温度は高温を維持し、未燃アンモニアは22%と $\lambda=2.0$ とほぼ同等となった。また、燃焼最高温度が $\lambda=2.0$ より70℃程高く長時間維持されるため、NO_x値も400ppm程高くなっている。さらに効率低下分、未燃アンモニア量は同等ではあるがCO₂の削減率も15%程悪化している。これより、20%アンモニア混合燃焼では $\lambda=2.0$ 前後が最適であるとの指針を得た。(図J-3、J-4、J-5、表J-2)

② 燃料噴射時期の影響

同一燃料噴射時期において空気過剰率(λ)を変更した場合、 λ を下げるに従い圧縮圧力が低下するため、主燃焼噴射時期を同一とした場合燃焼最高圧力も低下傾向となる。効率を維持し、燃焼温度を維持するために、 λ に合わせた(空気量もしくは給気圧力)燃料噴射時期に調整する必要がある。 $\lambda=2.5$ 、噴射時期 17.5 deg BTDC と $\lambda=2.0$ 、噴射時期 19.5 deg BTDC の比較を行った。燃焼最高圧力は 1MP 程度差はあるものの、通常ディーゼルと同等値となり、後者調整の場合熱発生率より良好な燃焼が得られているのがわかる。それに伴い未燃アンモニアも 11.5%と半減した。これより、燃料噴射時期を各燃焼条件にあわせ調整し、燃焼最高圧力を基本仕様ディーゼルと同等に維持することが必要であることがわかった。

③ アンモニア層状度の影響

主油燃料噴射による燃焼において、壁面近傍において燃焼温度が上昇し、難燃性であるアンモニア+空気混合気において壁面付近でのアンモニア濃度を上昇させることが未燃アンモニア減少に有効であると判断した。これよりその影響度を調査するために中心部と壁面部の濃度差を $\pm 20\%$ (Case8-1)、 $\pm 70\%$ (直線濃度傾斜: Case8-4) および $\pm 80\%$ (燃焼室トップ希薄:Case8-5)の3ケースにおいて燃焼計算を実施した。尚、計算において $\lambda=2.0$ 、燃料噴射時期 19.5 deg BTDC は共通とした。

層状度 $\pm 20\%$ では均一混合気と比較し未燃アンモニアの減少はほとんど見られなかったが、 $\pm 70\%$ まで層状度を上げた場合、未燃アンモニア 6.2%と大幅な改善効果が得られた。

また、 $\pm 80\%$ (燃焼室トップ希薄)では $\pm 70\%$ 条件と未燃アンモニア量はほぼ同等であったが、燃焼効率が若干良好となり、効率で 1.7%point 向上した。(図 J-6、J-7、J-8、表 J-3)

その他排ガス成分では Case8-4、8-5 とともに N_2O 115ppm、PM は 0.005g/kWh と特に PM の大幅な低減を示した。

④ 燃料油プレ噴射による影響

燃料油のプレ噴射による未燃アンモニアへの影響度を調査するために、下記条件にてプレ噴射有(Case8-3)、無し(Case8-1)の比較計算を実施した。

- ・プレ燃料噴射：噴射時期 80deg BTDC、噴射量 15% (噴射量比)
- ・主燃料噴射：噴射時期 19.5 deg BTDC、噴射量 85% (噴射量比)
- ・共通条件： $\lambda=2.0$ 、層状度 $\pm 20\%$ 、主燃料噴射時期 19.5deg BTDC

結果として、プレ噴射を行った場合、未燃アンモニア 6.3%と大幅な低減効果が得られたが、 NO_x 値が 1200ppm と約 2.4 倍まで増加した。

燃焼状況はプレ噴射噴霧は、噴射時期が 80 deg BTDC と早い噴射のため、着火温度に達する前に未燃焼のまま壁面に到達。壁面リッチ状態($\lambda < 2$)にて主噴射による火炎が到達前に壁面付近において過早点火し燃焼を開始。これによるアンモニアの燃焼効率が向上したと考えられる。(図 J-9、J-10、J-11)

⑤ 燃料油プレ噴射パターン変更の影響

プレ噴射によりアンモニアの燃焼効率改善を得たため、プレ噴射のパターンを変更し効果の比較計算を実施した。また、 NO_x 値の増加を抑えるため、層状度および空気過剰率、プレ噴射パターンを変更しその効果を調査した。

Case8-2 として噴射パターンを下記に変更し計算を実施。

- ・プレ燃料噴射：噴射時期 50deg BTDC、噴射量 30%（噴射量比）
- ・主燃料噴射：噴射時期 19.5 deg BTDC、噴射量 70%（噴射量比）
- ・共通条件： $\lambda=2.0$ 、層状度 $\pm 20\%$ 、主燃料噴射時期 19.5deg BTDC

Case8-2 は 8-1 と比較し、プレ噴射量を 30%と 2 倍とし、Pmax を同等とするため、噴射時期を 80deg から 50deg BTDC と遅角させた。その結果、未燃アンモニア 3.4%と本研究の目標値として いる 5%を超える効果が得られた。Case8-2 では壁面近くでの過濃スポットが得られ、またプレ噴射が 50deg BTDC と圧縮温度の高い時期に行われているため、プレ噴射燃料の燃焼が改善、噴霧未燃 drop も減少した。また、この燃焼改善によりアンモニア混合気が長時間、高温状態となりこれにより未燃アンモニア減少が得られたと考える。但し、NO_x 値は 1900ppm まで増加する結果となった。

Case8-2 での NO_x 上昇を改善するために、空気過剰率、層状度、プレ噴射パターンを変更し Case9 として計算を実施した。

- ・プレ燃料噴射：噴射時期 50deg BTDC、噴射量 20%（噴射量比）
- ・主燃料噴射：噴射時期 17.5 deg BTDC、噴射量 80%（噴射量比）
- ・空気過剰率： $\lambda=2.2$
- ・層状度： $\pm 80\%$ （壁面過濃）

結果として、NO_x 値は 1300ppm まで減少したが、未燃アンモニアは 7.3%と悪化した。

また、N₂O 値も Case8-2、8-3 では 160~180ppm に対し 260ppm と上昇した。

(図 J-12、J-13、J-14、J-15、J-16、表 J-4)

2) 実機試設計

燃焼シミュレーション結果に基づき、燃料噴射系、アンモニア供給系の試設計を行った。

① 燃料噴射系

シミュレーション結果より、従来型機械式燃料噴射装置では未燃アンモニア低減に対し不適と判断し、電子噴射式コモンレール燃料噴射装置の試設計を実施した。

中間負荷においても高圧噴射（噴射圧 180MPa）を維持し、噴射時期可変、またプレ噴射も可能なものとした。(図 J-17、J-18、J-19、J-20)

② アンモニア供給系

アンモニア-空気予混合気の生成は、均一予混合気を得るにはシリンダヘッド前の給気管にガス弁を装備しアンモニアを供給（熱量比 20%）。それにより給気管内にて混合を行いより均一な状態にて給気弁を通しシリンダ内へ供給する手法がとられる。

今回のシミュレーション結果では、未燃アンモニアを低減させるには主燃焼が行われ、燃焼温度の高くなるシリンダ壁面で過濃とすることが一つの手法となる。

壁面過濃を実現するために、シリンダ壁面よりアンモニアを直接投入する装置の試設計を実施した。(図 J-21、J-22)

3) アンモニア輸送船市場調査

① アンモニア貿易状況

アンモニア貿易の中心地は黒海湾岸に Yuzhny（取引ハブ）であり、安価な天然ガスを算出する国からの輸出となる。またアジアはアンモニアに関してはバランスのとれた供給状況となっている。

アンモニアの全世界での年間海上貿易量は16～19百万トンで推移しており、肥料会社であるYara社で5百万トン、海運会社であるTrammo社で3百万トン、貿易会社であるEXMAR社で2百万トンとこの3社で50～60%の輸送量を占めている。

② アンモニア輸送船調査

アンモニア輸送船はLPGとの兼用船が多く、IMO（国際海事機関）、LR（ロイド船級協会）登録上はLPG輸送に分類されている。この中よりアンモニア専用、兼用船を抽出調査を行った。240～50,000トン(GT)に分布しており合計530隻が稼動している。尚LPG登録船は2287隻であることより(Seawebより抽出)LPG船の約20%がアンモニア輸送を行っていることとなる。

搭載エンジンにつき4ストローク中速ディーゼルエンジンと2ストローク低速ディーゼルエンジンの区分けにおいて240-5,000トン級までは660-4400kWクラスの4ストロークエンジンが主流となっているが、5,000-10,000トン級では2,700-7,300kWクラスの4ストローク、2ストロークエンジンがほぼ同数であり、このクラスがエンジン機種の分岐点となっている。20,000-50,000トン級では全船7,300-13,700kWクラス2ストロークエンジン搭載となっている。(表J-5)

③ アンモニア輸送船建造予測

アンモニア輸送を含むケミカル船の耐用年数は15～20年とされておりリプレースされる。これより建造数を推測すると4ストローク搭載船において10～15隻/年、2ストローク搭載船において15～25隻/年であり、全世界ベースにおいて合計25～40隻/年の建造数が期待される。

3-2. 蒸気タービンリパワリングへの適用検討

(1) 研究内容

1) 適用フローの検討

ボイラでの生成蒸気をリパワリングするアンモニア燃焼装置の選定およびリパワリング後のアンモニア燃焼排ガスの有効利用を考慮した適用フローを検討する。

2) 熱物質収支による適用検討と課題抽出

上記で検討した適用フローについて熱物質収支計算を実施し、各流量、温度を算定するとともに、アンモニア燃焼排ガスの組成を考慮して全体プロセスを把握し、課題を抽出する。

3) コスト試算および市場性調査による実施可能性評価

本技術の経済性成立条件を算定し、実施可能性を評価する。

(2) 研究成果

1) 適用フローの検討

適用フローの検討結果を図J-23に示す。

蒸気リパワリングの熱源としては以下の3種を提案した。

Case1 アンモニア燃焼装置 (バーナ)

Case2 アンモニアガスタービン

Case3 アンモニアガスタービン+燃焼装置 (バーナ)

また、アンモニア燃焼排ガスの有効利用方法として、触媒脱硝前の排ガス再加熱の熱源として利用することを提案した。また、残りの燃焼排ガスはボイラ前に供給し、ボイラでの蒸気発生量を増加させることを提案した。

2) 熱物質収支計算による適用検討と課題抽出

①熱物質収支計算プログラム

上述した適用フローの実現性、課題抽出を目的として熱物質収支計算を実施した。計算プログラムの概要を以下に示す。

Case1 アンモニア燃焼装置によるリパワリング

- ・アンモニア燃焼排ガスは 900℃に設定
- ・焼却炉からの発生蒸気をリパワリングするのに必要なアンモニア燃焼排ガスを算定
- ・上記温度、排ガスを満たす燃焼装置へのアンモニア供給量、空気供給量を算定
- ・熱交換器出口排ガスは触媒脱硝前に再加熱が不要となる流量を供給し、残りは二次燃焼室へ供給

Case2 アンモニアガスタービンによるリパワリング

- ・アンモニアガスタービン排ガスは 550℃に設定
- ・焼却炉からの発生蒸気をリパワリングするのに必要なアンモニアガスタービン排ガスを算定
- ・上記温度、排ガスを満たすガスタービンへのアンモニア供給量、空気供給量を算定
- ・熱交換器出口排ガスは Case1 と同様に算定

Case3 アンモニアガスタービン+燃焼装置によるリパワリング

- ・アンモニアガスタービンの排ガス (550℃) をアンモニア燃焼装置で 900℃に昇温
- ・焼却炉からの発生蒸気をリパワリングするのに必要なアンモニア燃焼排ガスを算定
- ・上記温度、排ガスを満たす燃焼装置、ガスタービンへのアンモニア供給量、空気供給量を算定
- ・熱交換器出口排ガスは Case1 と同様に算定

アンモニア燃焼排ガス中の NO_x 濃度は 100、500、1,000ppm の 3 水準を仮定して、上記のそれぞれの Case につき、脱硝用アンモニア量の計算も実施した。

②熱物質収支計算

上記計算プログラムを用いて熱物質収支計算を実施した。計算前提を以下に示す。

廃棄物処理施設規模：処理量 150t/日×2 系列、蒸気発生量 20t/h×2 系列

蒸気リパワリング温度：400→450℃

各 Case のフローを図 J-24～26 に示す。

Case1 アンモニア燃焼装置によるリパワリング

- ・燃焼装置でのアンモニア使用量は 414kg/h となる
- ・燃焼排ガス量は 2 系列で 7,000Nm³/h 程度で、これは廃棄物焼却施設の排ガス量の 11%に相当す

る

- ・蒸気温度、蒸気流量の増加により、発電出力が 530kW 程度増加する

Case2 アンモニアガスタービンによるリパワリング

- ・ガスタービンでのアンモニア使用量は 4,650kg/h となる
- ・燃焼排ガス量は 2 系列で 30,000Nm³/h 程度で、これは廃棄物焼却施設の排ガス量の 45%に相当する
- ・蒸気温度、蒸気流量の増加、およびガスタービン発電により、発電出力が 3,000kW 程度増加する

Case3 アンモニアガスタービン+燃焼装置によるリパワリング

- ・ガスタービン、燃焼装置でのアンモニア使用量はそれぞれ 900kg/h、212kg/h となる
- ・燃焼排ガス量は 2 系列で 7,000Nm³/h 程度で、これは廃棄物焼却施設の排ガス量の 11%に相当する
- ・蒸気温度、蒸気流量の増加、およびガスタービン発電により、発電出力が 820kW 程度増加する

③適用検討と課題抽出

熱物質収支計算から算定された各 Case の、発電量、アンモニア使用量、排ガス量の比較を図 J-27～29 に示す。発電量、アンモニア使用量は Case2 で最も大きくなる。一方、排ガス量については Case1, 3 では従来の廃棄物焼却施設の排ガス量に比べて 11%程度の増加に止まるが、Case2 では 45%程度の増加となる。実機への導入を考えた場合、Case2 は排ガス処理系の改造に係る負荷が大きく、実現性は低いと考える。

3) コスト試算および市場性調査による実施可能性評価

上記の熱物質収支より求めた発電増加量およびアンモニア使用量を用いて、アンモニア単価を変数として運転費の増減を算定した。年間稼働日数は 250 日、売電単価は 11 円/kWh とした。結果を図 J-30 に示す。Case1、2、3 でそれぞれアンモニア単価が 14.1 円/kg、7.1 円/kg、8.1 円/kg 以下で売電収入がアンモニア購入費を上回る結果となった。

本プロセスが実現するためには大幅なアンモニア価格の低下が必須であり、現状の実施可能性評価としてはかなり実現性が低い結果となった。

3-3. まとめ

(1) 船用ディーゼルエンジンへの適用検討

- ① アンモニア+空気混合気の層状度を±70%（壁面リッチ）とし、燃料油主燃焼における高温領域にアンモニアを過濃に分布させることにより、NO_x 値をベースディーゼルと同等値に維持しつつ、未燃アンモニアを 6.2%まで低減できる計算結果が得られた。
- ② 燃料油を噴射時期 50deg BTDC、30%量プレ噴射させることにより、未燃アンモニアを 3.4%まで低減できる計算結果が得られた。但し、NO_x 値がベースディーゼルの約 3 倍となり、プレ噴射により未燃アンモニアを低減させるには、NO_x 生成を抑制するパラメーターの見出しが必要であることが分かった。

- ③ 層状度の変更、燃料プレ噴射の実施、層状度+プレ噴射複合と3つのアプローチによる計算を実施し、目標値である未燃アンモニア5%をほぼ達成した。
- ④ シミュレーション結果より、壁面過濃となるアンモニア+空気混合気の生成が有効であることより、アンモニアをシリンダ壁より直接投入する機構の試設計を実施した。
- ⑤ アンモニア輸送船調査より、4ストロークエンジンでは10~15隻/年、2ストロークエンジンでは15~25隻/年のアンモニア輸送船建造予測（LPG船兼用含む）が得られ、将来的にはアンモニア燃料直接燃焼を可能としたディーゼルエンジンの需要が確認できた。

(2) 蒸気タービンリパワリングへの適用検討

① 適用フローの検討

- ・アンモニアバーナおよびアンモニアガスタービンにより廃棄物焼却施設で生成する蒸気をリパワリングするフローを提案した。
- ・蒸気リパワリング後のアンモニア燃焼排ガスを廃棄物処理施設の触媒脱硝前段に戻し、排ガス昇温の熱源として使用するフローを提案した。

② 熱物質収支計算による適用検討と課題抽出

- ・上記適用フローに対する熱物質収支計算プログラム作成。各Caseにつき計算を実施し、ガスタービンによるリパワリングは排ガス増加量が多く、実現性が困難であることが分かった。

③ コスト試算および市場性調査による実現可能性評価

- ・最も実現性が高いと思われたCase1においてもアンモニア単価が14.1円/kgを下回らないと経済性が成り立たない結果となり、実現可能性は低いと考える。

3-4. 今後の課題

(1) 船用ディーゼルエンジンへの適用検討

各パラメーター変更計算により、目標値としていた未燃アンモニア5%以下とする条件を見出すことができた。具体的にはアンモニア層状度を主燃焼温度の高い領域で高くし、プレ噴射により早期に油燃焼の燃焼を開始し、高温部領域を拡大させることによる方式である。効率もオリジナルディーゼルより高効率となり、CO₂の低減率も20%以上となったが、NO_x値が上昇する傾向となった。プレ燃料噴射を組み合わせず、層状度の改善のみにてNO_xの大幅な上昇を伴わずアンモニア未燃率6%まで達成する条件を見出したことより、今後の課題としては、アンモニアの燃焼室分布の更なる追求で未燃アンモニアを5%以下とすること。さらに、壁面でのアンモニア濃度分布を大幅に上げるため、シミュレーションで模擬したアンモニア投入方法、給気手法の実機対応の検討、計算、設計を行うことにある。また、プレ噴射の最適化によりNO_xの大幅上昇を伴わない最適燃焼を見出すことも課題となる。

(2) 蒸気タービンリパワリングへの適用検討

適用フロー検討、熱物質収支計算により蒸気温度を50℃昇温するための運転条件を見出すことができた。しかしながら。コスト試算の結果、アンモニア価格は大幅に低下しないと経済的に成立しないことが分かった。今後の課題としては低コストアンモニアの供給手段と燃焼排ガス中NO_x濃度の低減が挙げられる。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> なし

<査読なし(総説等含む)> なし

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> 国内 なし、海外 なし

<口頭発表> 国内 なし、海外 なし

<ポスター発表> 国内 なし、海外 なし

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内 なし、海外 なし

(3) プレス発表

なし

(4) マスメディア等取材による公表

なし

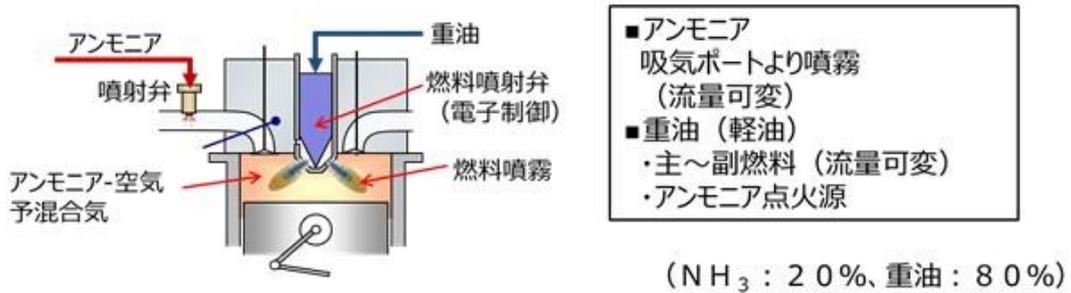
5. 特許出願実績

なし

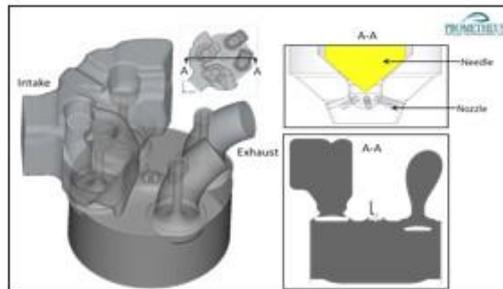
6. 参考文献

- 1) 西尾ら、日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol.47、No.1、2012
- 2) 仁木ら、第86回日本マリンエンジニアリング学術講演会資料 227、2016
- 3) 仁木ら、海上技術安全研究所研究発表会資料 PS-15、2016
- 4) 小島ら、水素エネルギーシステム、Vol.36、NO.4、2011
- 5) 小島ら、日本機械学会誌 第58巻184号、2016
- 6) 小島ら、自動車技術会誌 Vol.70、NO.11、2016

< 図表一覧 >



図J-1 アンモニア燃焼手法

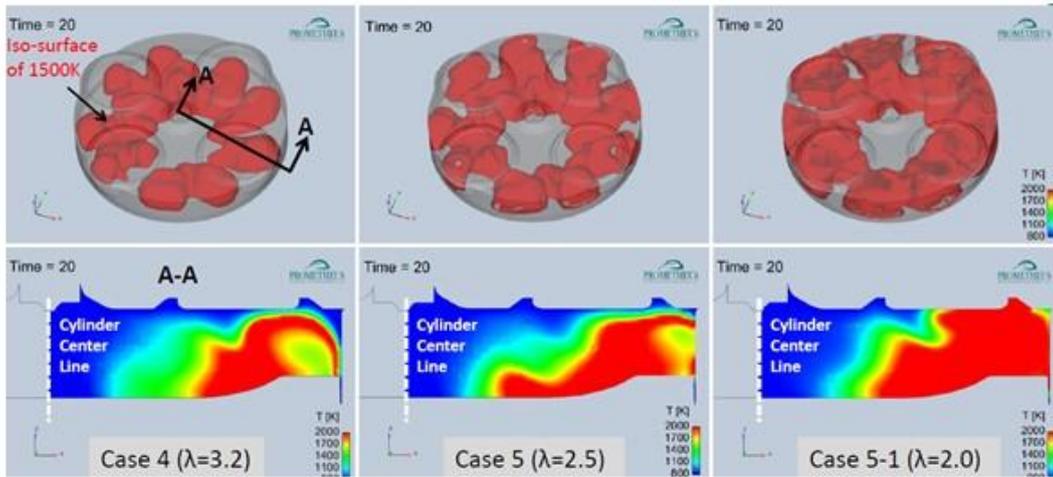


*ノズル：9穴、0.71mm、
140deg

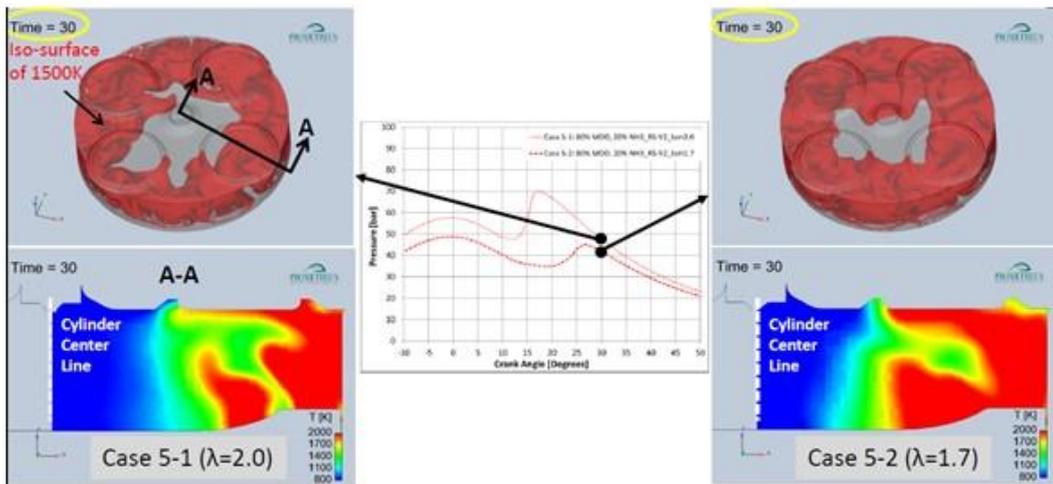
図J-2 シリンダヘッド3D、噴射ノズル

表J-1 ディーゼル基本諸元 (計算ベース)

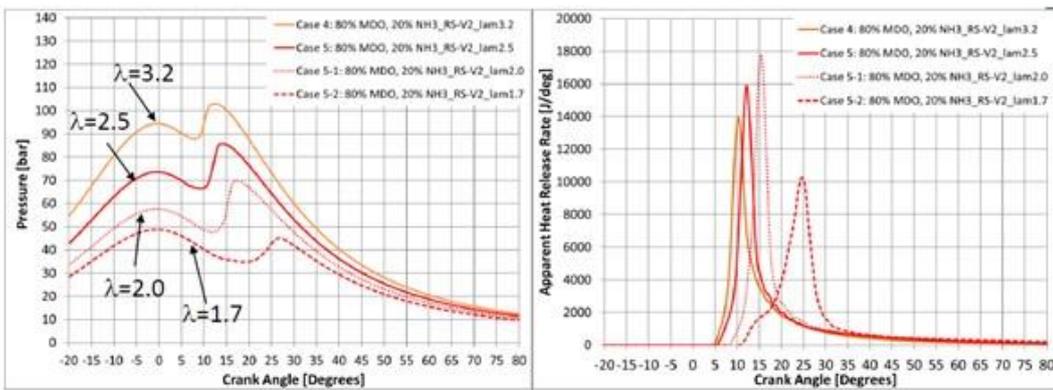
MAN PC2-6B Diesel Engine Information	
Bore, mm	400
Stroke, mm	500
Con Rod Length, mm	1080
Volumetric Compression Ratio	14.5
Distance between top of piston and head at TDC, mm	27
Operating Condition for 50% Load	
Engine Speed, RPM	600
Intake Port Temperature, K	317
Intake Port Pressure, kPa (abs)	260.5
Combustion Average Exhaust Port Temperature, K	592
Exhaust Port Pressure, kPa (abs)	191
Diesel Fuel Injection Timing, CAD ATDC	-9.5
Estimated Lambda	3.2
Brake Thermal Efficiency (BTE), %	44.4
Maximum Combustion Pressure, MPa	11.2
Brake Mean Effective Pressure (BMEP), MPa	1.12
Engine Exhaust Emissions (NOx, THC, PM), ppm or g/kw-hr	NOx 657 ppm
	THC 104 ppm
	PM 0.05 g/kw-hr
	O ₂ 14.7%



図J-3 空気過剰率変更による燃焼温度分布



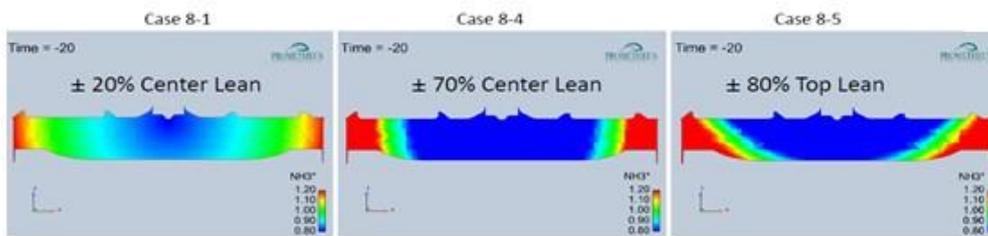
図J-4 $\lambda=2.0$ 、 1.7 での温度分布と筒内圧比較



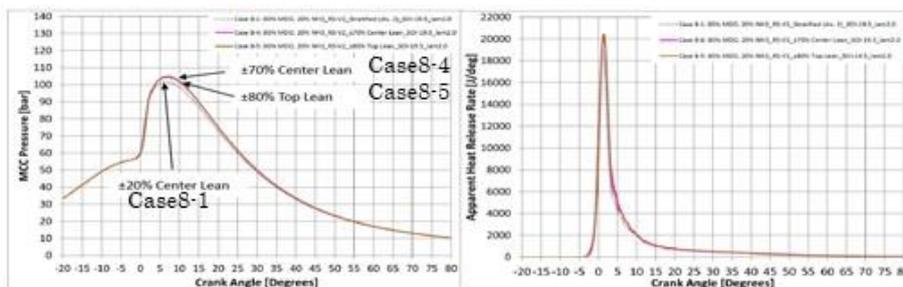
図J-5 空気過剰率変更による筒内圧比較

表J-2 空気過剰率変更による諸性能比較

case	燃料	空気過剰率	効率		NOx		未燃NH3	CO2低減
			図示	偏差	濃度	偏差		
1	重油100%	3.2	45.8%	-	657ppm	-	0	0
4	重油 80% NH3 20%	3.2	44.5%	-2.8%	468ppm	-29%	37%	-10.2%
5		2.5	45.7%	-0.1%	415ppm	-37%	27%	-14.4%
5-1		2.0	45.3%	-1.0%	460ppm	-30%	21%	-14.9%
5-2		1.7	38.6%	-16%	863ppm	+31%	22%	+0.3%



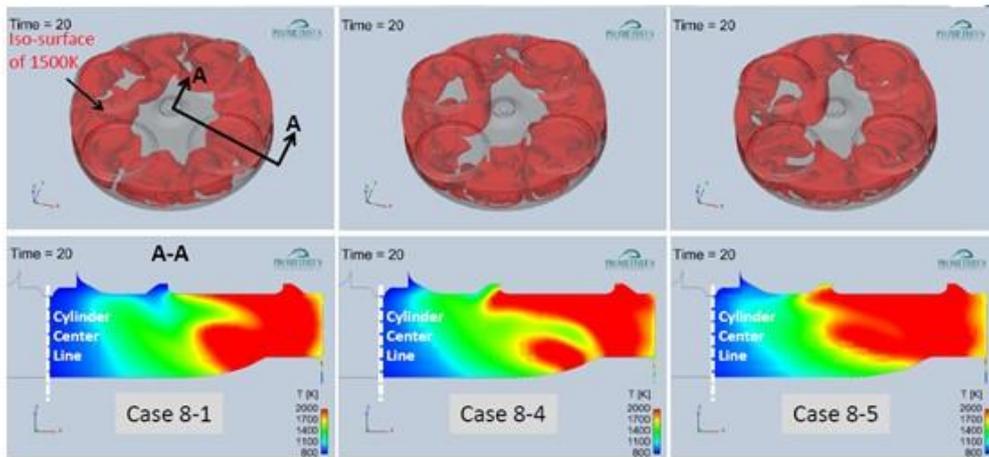
図J-6 アンモニア層状度比較



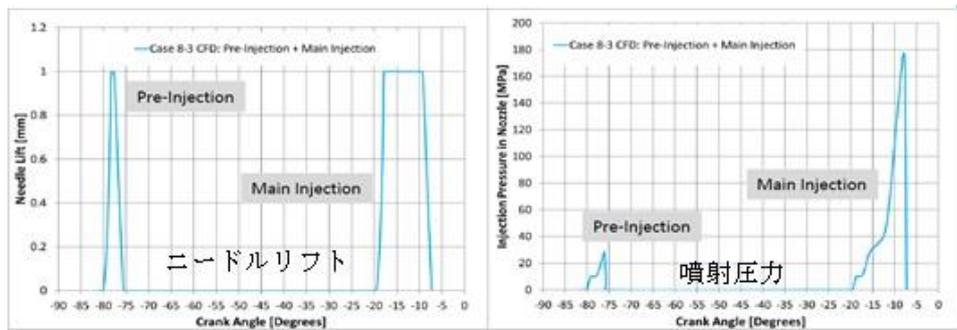
図J-7 アンモニア層状度による筒内圧、熱発生率比較

表J-3 アンモニア層状度変更による諸性能比較

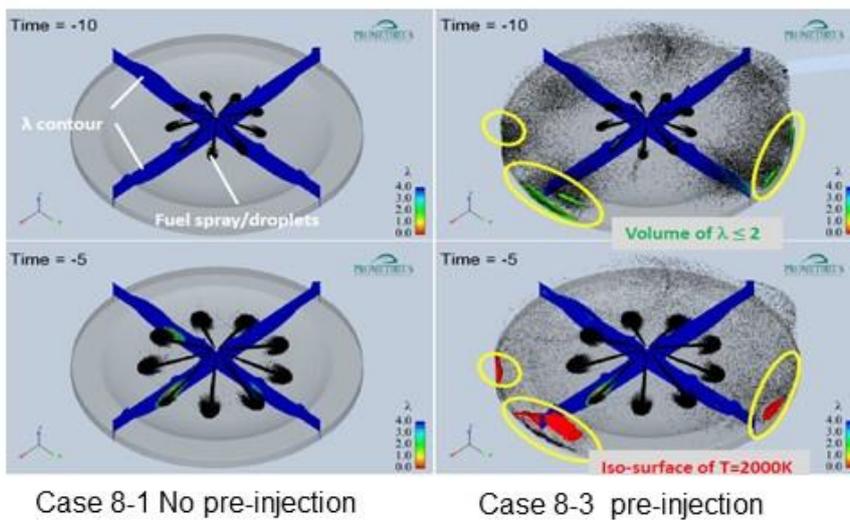
case	燃料	層状度(壁面濃)	噴射時期	効率		NOx		未燃NH3	CO2低減
				図示	偏差	濃度	偏差		
1	重油100%	0	-9.5	45.8%	-	657ppm	-	0	0
8-1	重油 80% NH3 20%	±20%	-19.5	51.4%	+12%	476ppm	-28%	11.5%	-26.7%
8-4		±70%	-19.5	52.0%	+14%	599ppm	-8.8%	6.2%	-29.5%
8-5		±80%	-19.5	53.7%	+17%	592ppm	-9.9%	6.2%	-31.8%



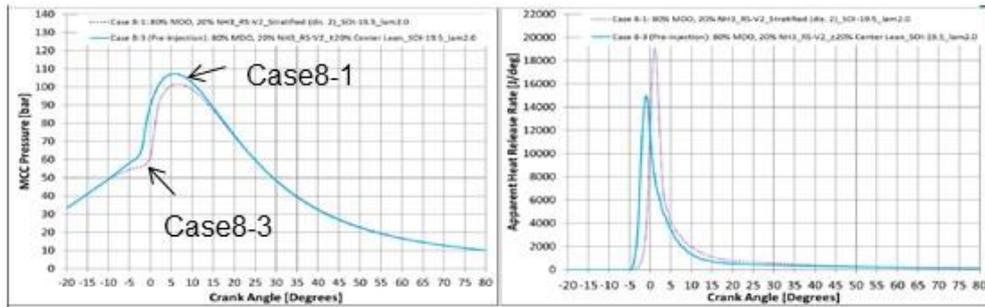
図J-8 アンモニア層状度による燃焼温度比較



図J-9 プレ噴射パターン



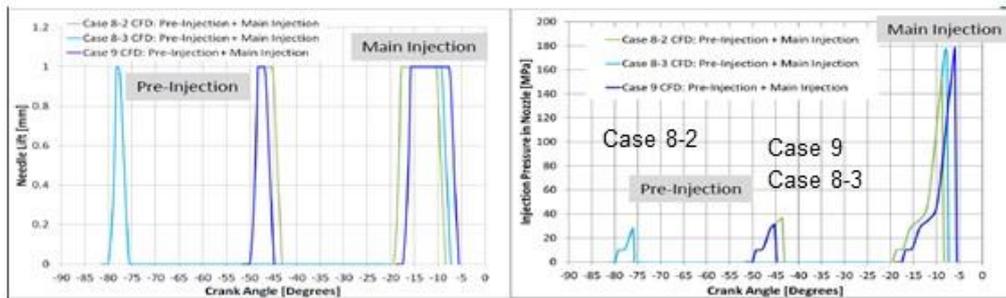
図J-10 プレ噴射による噴霧分布および燃焼



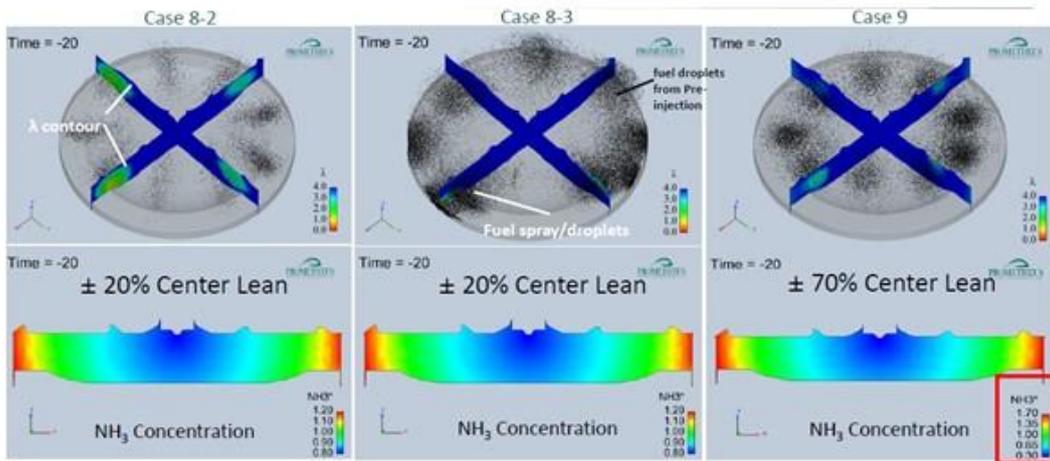
図J-11 プレ噴射有、無における筒内圧および熱発生率比較

表J-4 プレ噴射変更による諸性能比較

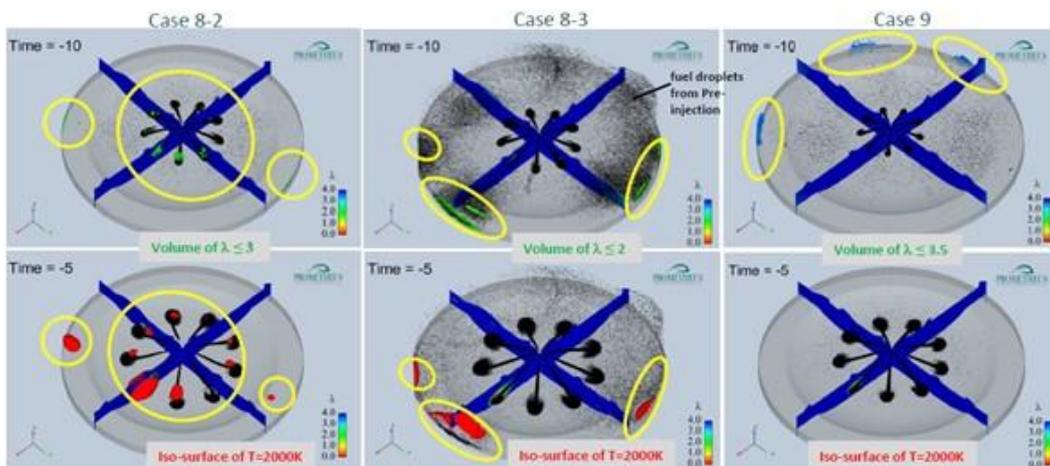
case	燃料	λ	Pre噴射 時期	主噴射 時期	効率	NOx	未燃 NH3	CO2 低減
					図示	濃度		
1	重油100%	3.2	-	-9.5	45.8%	657ppm	0	0
8-1	重油 80% NH3 20%	2.0	-	-19.5	51.4%	476ppm	11.5%	-26.7%
8-2		2.0	-50	-19.5	52.0%	1966ppm	3.4%	-26.1%
8-3		2.0	-80	-19.5	50.3%	1200ppm	6.3%	-27.2%
9		2.2	-50	-17.5	50.4%	1323	7.3%	-27.3%



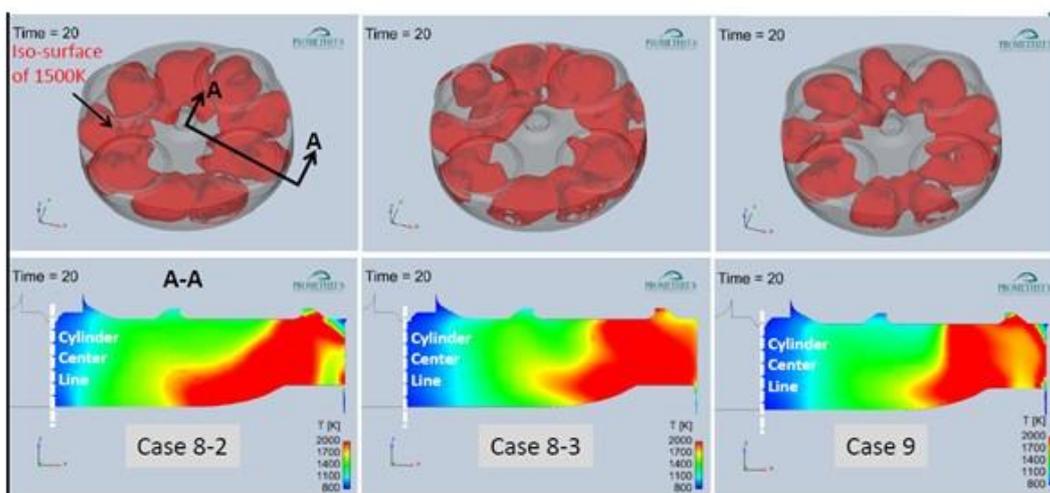
図J-12 プレ噴射パターン比較



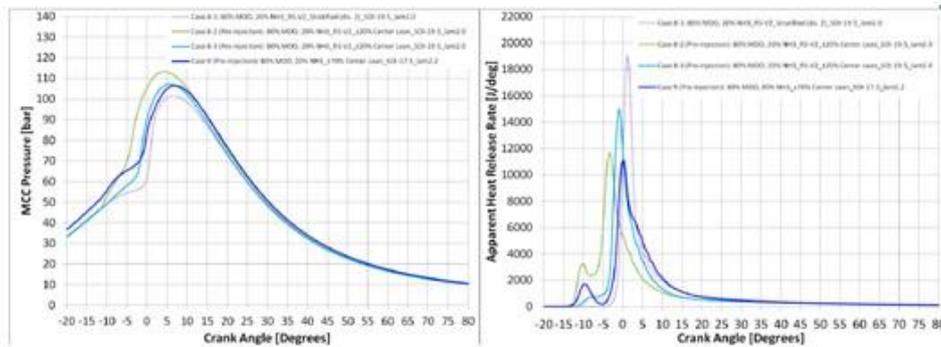
図J-13 プレ噴射による噴霧分布比較 (20deg BTDC)



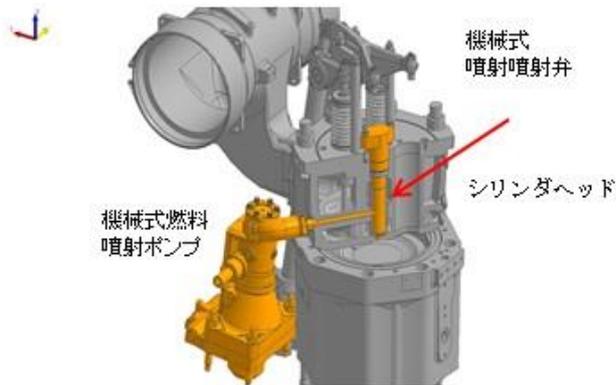
図J-14 プレ噴射による λ 分布および高温部分布比較



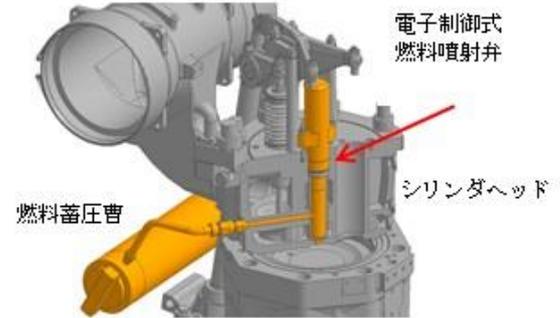
図J-15 プレ噴射による燃焼温度比較



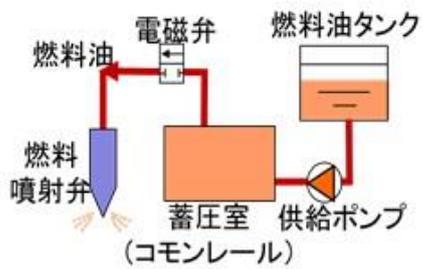
図J-16 プレ噴射による筒内圧および熱発生率比較



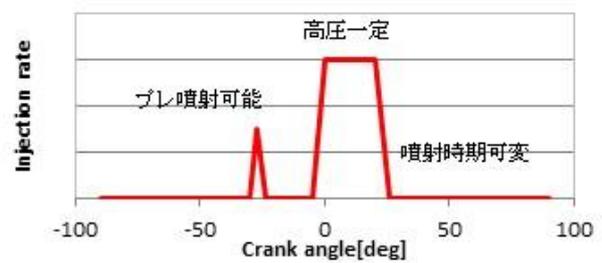
図J-17 機械式燃料噴射装置 (従来型)



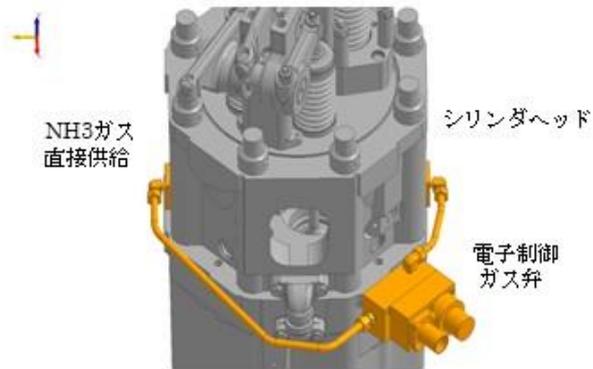
図J-18 電子制御コモンレール燃料噴射装置



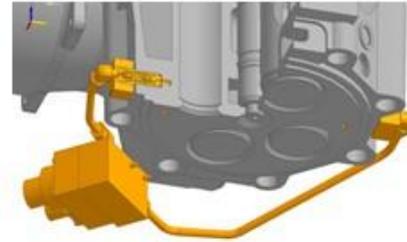
図J-19 コモンレール燃料噴射システム



図J-20 コモンレール燃料噴射パターン



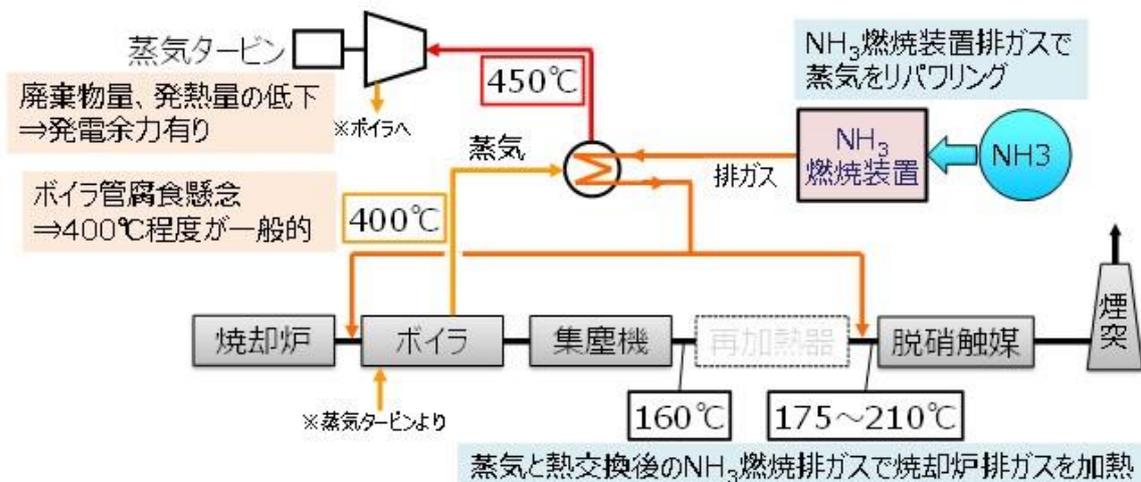
図J-21 アンモニア供給装置



図J-22 アンモニア供給装置

表J-5 アンモニア輸送船

	Weight GT ton	Ship number	Engine output kW (total)	Stroke		note
				4	2	
1	240-1,000	18	660-1,770	18	0	
2	1,001-2,000	19	700-1,540	17	4	
3	2,001-5,000	97	1,500-4,350	102	11	
4	5,000-10,000	109	2,700-7,280	58	65	2,4ストロークの境界
5	10,000-20,000	130	4,410-13,560	2	128	
6	20,000-30,000	98	7,310-11,100	0	98	
7	30,000-40,000	23	9,720-13,560	0	23	
8	40,000-50,000	36	12,400-13,700	0	36	
	total	530		201	367	LPG船: 2287隻

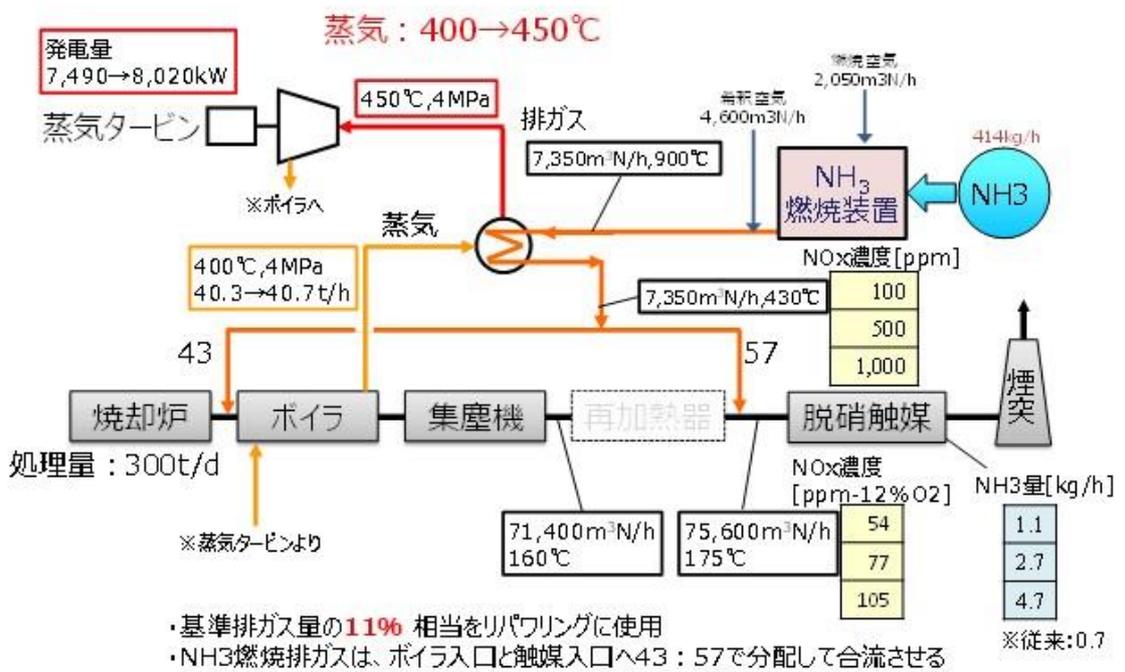


検討条件

	NH ₃ 燃烧装置
Case.1	バーナ
Case.2	ガスタービン
Case.3	ガスタービン+バーナ (タービン排ガスを追い焚き)

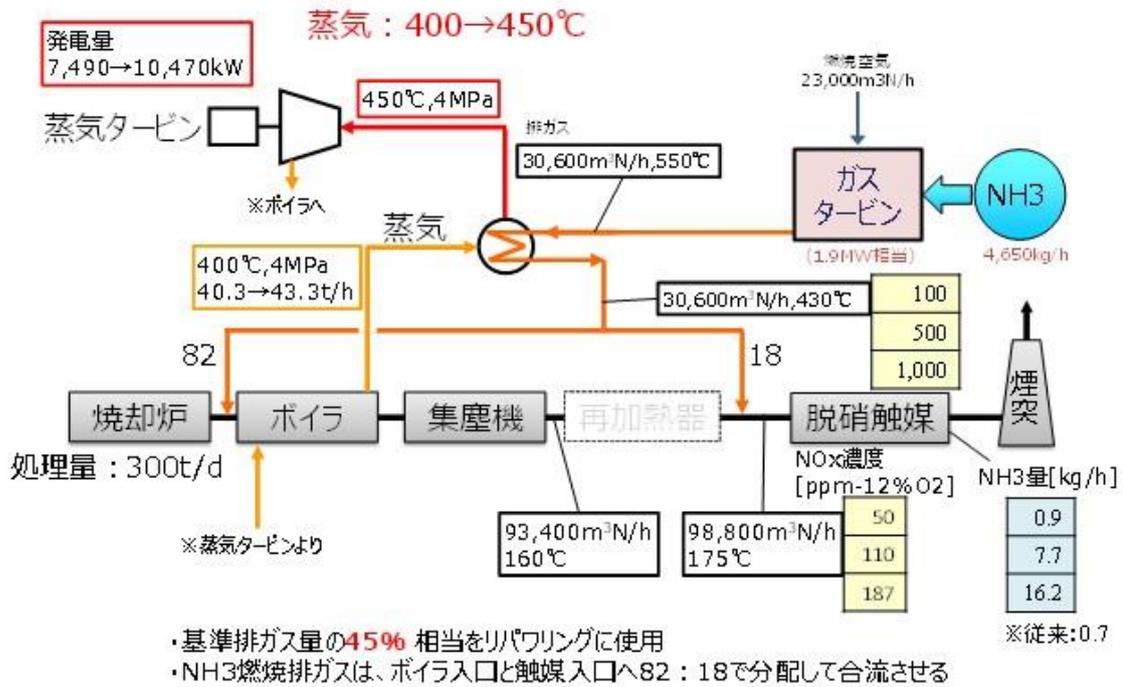
- 検討の着目点
- ・排ガス流量の増加
 - ・発電量の増加
 - ・NH₃使用量

図J-23 適用フローの検討結果

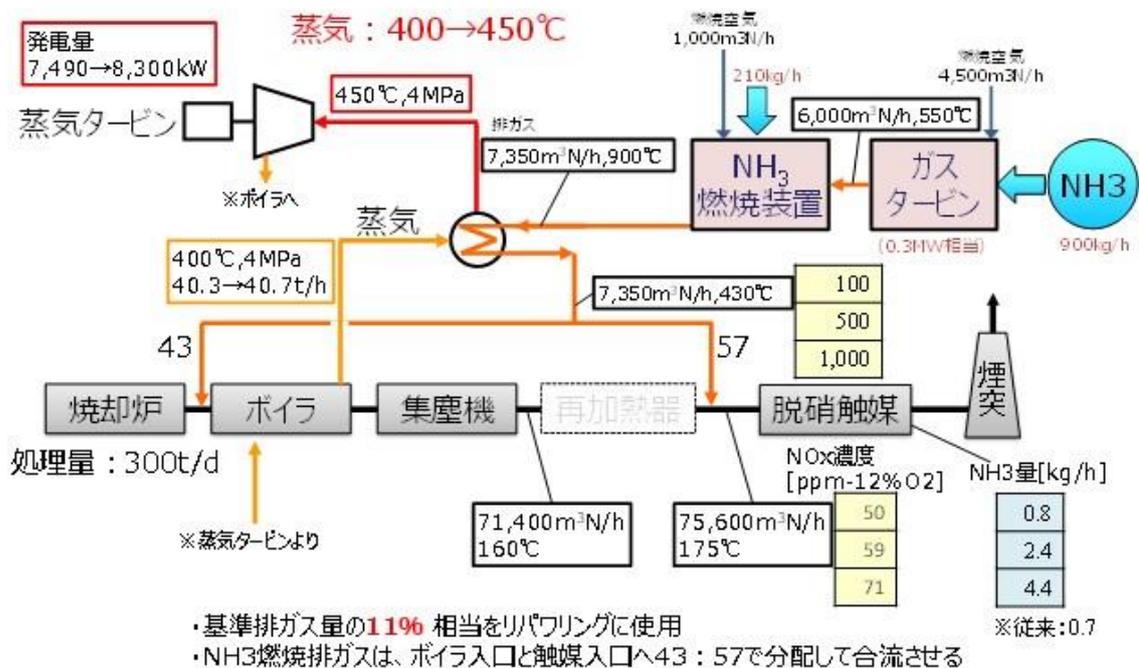


- ・基準排ガス量の**11%**相当をリパリングに使用
- ・NH₃燃烧排ガスは、ボイラ入口と触媒入口へ43 : 57で分配して合流させる

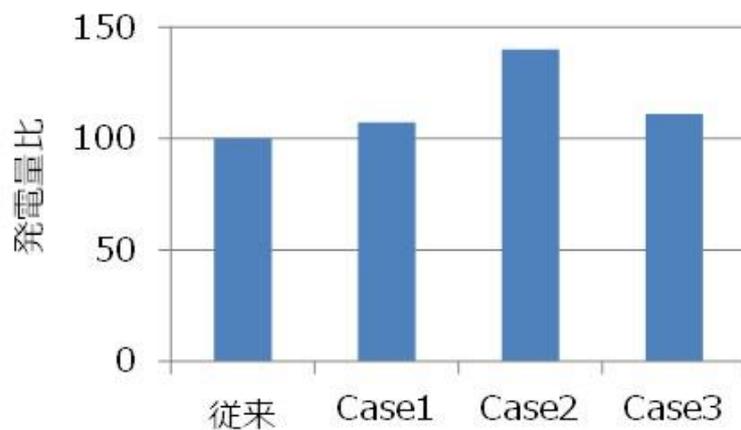
図J-24 Case1の適用フロー



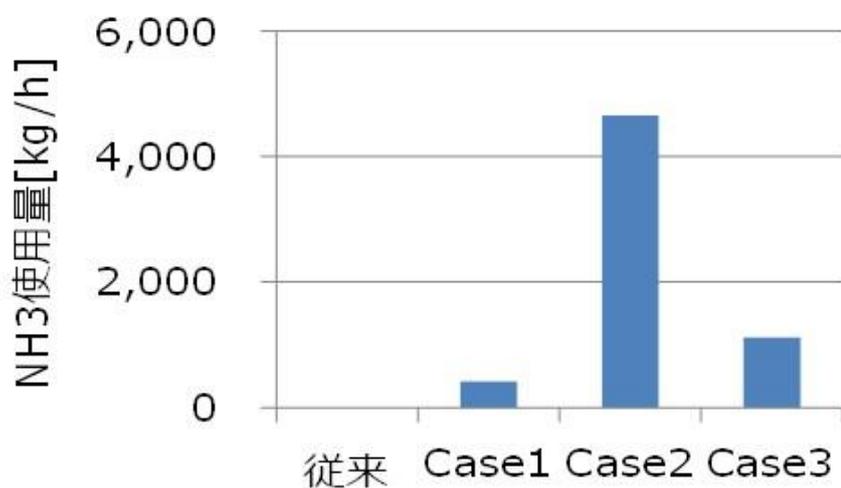
図J-25 Case2の適用フロー



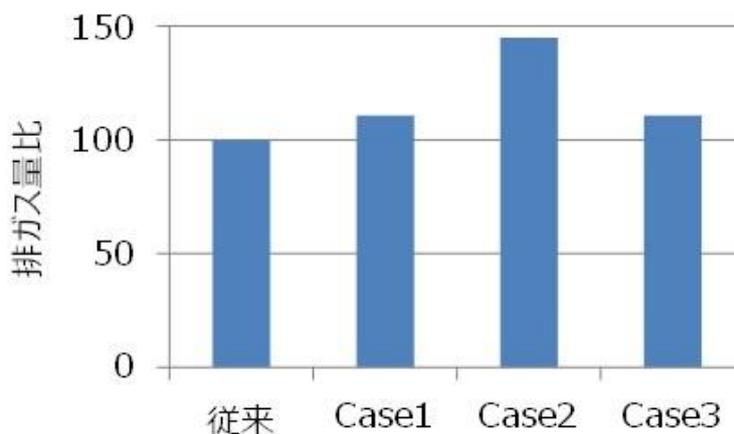
図J-26 Case3の適用フロー



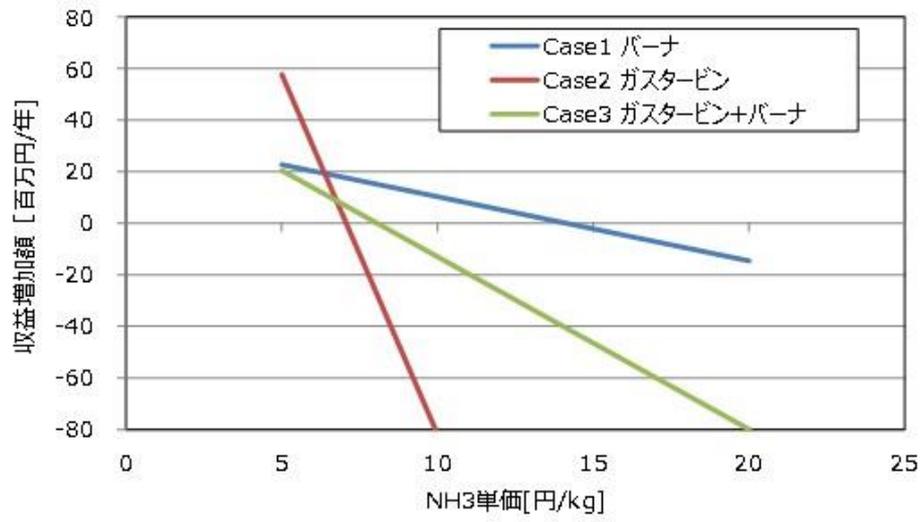
図J-27 各ケースの発電量比較



図J-28 各ケースのアンモニア使用量比較



図J-29 各ケースの排ガス量比較



図J-30 アンモニア単価と収益増加額の関係