

密閉サイクル・ディーゼル機関技術史， 拾い読み

坂 上 茂 樹

はじめに

1. R., Diesel の再循環サイクル構想
2. 海軍技術研究所における基礎実験
3. Ricardo の提案
4. 日立造船の提案
5. 三井造船 *R-one*
むすびにかえて

はじめに

密閉サイクルとは作動流体をある限られた時間内、外界に排出することなく循環使用しつつ作動する原動機サイクルの謂いであり、容積型ならびに速度型蒸気動力プラントにおける凝結サイクル（及びそれを高度化した再生、再熱サイクル）はその典型である。むしろ、普通の蒸気機関車などを除くほとんどの蒸気動力プラントにおいてサイクルが密閉的であることは自明の前提である。

外燃式容積型熱空気機関の代表であるスターリング機関においてもサイクル自体の密閉性はそもそもの出発点であるが、そこではシール技術の難しさが高効率熱交換機調達の難しさと相俟って本格的実用化への二大障壁となっている¹⁾。

外燃機関の場合、燃焼ガスは作動流体とは別であるからその排気はサイクルの密閉性云々とは関係しない。従前、出現した蒸気動力プラントにおいても熱空気タービン・プラントにおいても潜水艦用スターリング機関等においても燃料の外焚きに困って生ずる燃焼ガスは外界に排出されて来た²⁾。

ところが、内燃機関ともなると、一口に作動流体を封じ込めるなどと称しても、その気筒は蒸気機関におけるような膨張装置専業であるワケではなく、作動流体を加熱するボイ

1) 決して実用に供されて来なかったワケではないスターリング機関の歴史と概要については兵働 務・米田裕彦『スターリングエンジン』パワー社、1990年、山下 巖・濱口和洋・香川 澄・平田宏一、百瀬 豊『スターリングエンジンの設計』パワー社、2009年、参照。但し、その技術的課題や将来についての著者たちの思いはかなり異なっている。前者56～60頁、後者21～23頁、参照。

2) 潜水艦用スターリング機関については山下他前掲書、252～253頁、参照。

ラ（熱交換器と燃焼器）の役割を兼ねせねばならぬ。因って、そこには燃焼生成物とりわけ排出ガスの処理という非常に厄介な問題が突き付けられて来る。

この内、速度型内燃機関であるガスタービン・プラントにおいては蒸気タービン・プラントの向うを張って空気（燃焼ガス）を作動流体とする密閉サイクル・ガスタービン・プラントが構想・提案されて来た。蒸気ではなく空気を作動流体とするが故に相対的に低い圧力をもってタービン入口空気温度 T_1 を比較的高く取り得ること……これが蒸気タービン・プラントに対して主張されたそのメリットである。

然るに、その実用実績は極めて乏しい。ライヴァルにおける蒸気条件が向上してしまえば蒸気を凝結させて T_2 を叩き落とすような芸当と本質的に無縁なこの種のガスタービン・プラントに立つ瀬が無くなったことは蓋し当然である。

以下に断片的紹介を試みるのは容積型内燃機関の中でもディーゼル機関における密閉サイクルのアイデアないしその実現に向けた研究開発の技術史である。この作業はある意味においては密閉サイクル・ガスタービンより稀薄なその存在への回顧であり、そこから導き出される教訓の再確認となる³⁾。

1. R., Diesel の再循環サイクル構想

密閉サイクル・ディーゼルのアイデア・ルーツは Rudolf Diesel（独：1858～1913）にある。但し、それは擬似密閉サイクル・ディーゼルあるいは再循環サイクル・ディーゼルとも呼ばれるべき構想であった。

ディーゼルが学生時代にカルノー・サイクルの実現を思い立ち、1893年、『合理的熱機関の理論と構造』を出版した件については最早、周知の事柄に属するであろう⁴⁾。

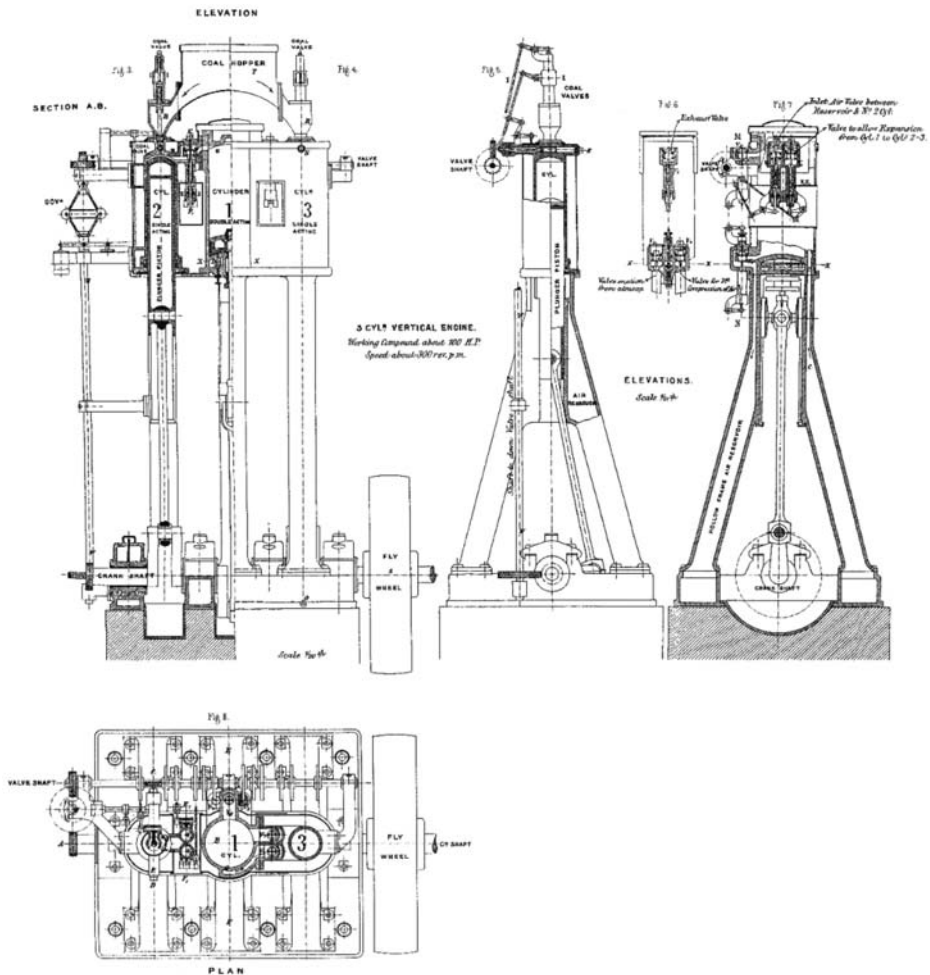
この書はディーゼル機関の理論的原点をなしているが、高圧化のために2ないしそれ以上の多段圧縮・多段膨張化が有利であるというのは「合理的熱機関」に係わる基本的主張であった。これは蒸気機関における多段膨張化に係わる理屈とほぼ同じで、高圧部のコン

3) その応用形態の一つたる軍用潜水艦における非大気依存推進 (Air-Independent Propulsion, AIP) システムないしエアレス・エンジン・システムの一形態たる密閉サイクル・ディーゼルの実験・実用事蹟について詳かにし得なかったことは遺憾とせざるを得ない。この点については何れもやや古くはあるが、緒明亮「海洋開発動力源」『日本機械学会誌』第75巻第643号、1972年8月、1273～1278頁、リチャード・コンプトン＝ホール/江畑謙介訳『潜水艦対潜水艦 深海の知られざるハイテク戦争』光文社、1989年、45～48頁、小原敬史「水中動力用無吸気ディーゼル機関」『日本造船学会誌』第722号、1989年8月、26～33頁、浦環・高川真一編『海中ロボット総覧』成山堂、1994年、202頁、表4.2.4-1、参照。

4) Rudolf Diesel, *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotor zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren*. Berlin, 1893. 『蒸気機関及び今日知られている内燃機関を代替すべき合理的熱機関の理論と構造』。Translated by B., Donkin, *Theory and Construction of a Rational Heat Motor*. London and N.Y., 1894.

この書物の内容全般についてはディーゼル著/拙訳・解説『ディーゼルエンジンはいかにして生み出されたか』山海堂、1993年、拙著『ディーゼル技術史の曲り角』信山社、1993年、にて紹介されているので、本稿ではごく粗略に言及するに止める。

図1 ディーゼルの“合理的熱機関”



Diesel, trans. by Donkin, *Theory and Construction of a Rational Heat Motor*. Plate II (Part).

ドイツ語原本の Tafel II は大き過ぎるため英訳本から採った。但し、用いた英訳本には破れがあり、その痕跡は本図にも再現されている。

パクト化がその効能である⁵⁾。

図1において中央はボア324mm, ストローク650mmの複動低圧気筒でピストン下部空間は第1段圧縮用ポンプとして機能する。左右はボア194mm, ストローク650mmの単動高圧気筒で中央気筒下部から予圧された空気を交互に受取り, 第2段の圧縮を行い, 燃焼ガスを中央気筒上部空間に排出し第2段膨張に供する。因みに, これらの寸法は出力を100PSとして計算された値である。

5) 内燃機関であるから蒸気の初復水・再蒸発は気にかけずとも済む。但し, 蒸気の影響というのは次節に見るように別の形で発現する。

圧縮ならびに膨張段数がどうであれ、カルノー・サイクル実現へ向けての最大の困難は準静的過程である等温膨張過程の実現という点にあった。何故なら、近似的にでもこれを実現しようとすればインジケータ線図は極めて痩せ細ったモノとなり、その面積を以てしては機関自体の摩擦損失に打ち勝てるかどうか、といった程度の仕事量とならざるを得ないからである。

このため、ディーゼルは実験系列の進展と共に圧縮終端点から始まる燃焼曲線を等温曲線と等圧曲線との間で上げ下げし得る、あるいは燃焼曲線の長さを加減し得る燃焼制御機関へと開発目標を切り替えることになり、このことが後々、特許紛争のタネともなった。

一方、これに先立って展開された『合理的熱機関の理論と構造』における議論の中では等温燃焼サイクルにおけるインジケータ線図の痩せ細りをカバーするため、サイクルの性状を変えるのではなく、等温燃焼サイクルそのものをより高い圧力の下で作動させるという補償案が示されていた。換言すれば、それは過給とは異なり、言わば今日スターリング機関において志向されている作動流体高圧化の先行提案に他ならぬアイデアであった。

そして、これを具体化する手立てこそが密閉サイクルであり、ディーゼルは『合理的熱機関の理論と構造』に *Der neue Motor als geschlossene Maschine* というキャプションを有する第6章を設けていた。81~83頁の僅か3ページ、図も式も無い短い章であり、密閉サイクル = “geschlossener Kreisprozess” と銘打たれてはいないが、その中身は正真正銘、擬似密閉サイクル・ディーゼル（再循環ないしリサイクル・ディーゼル）のハナシであった⁶⁾。

ディーゼルに拠れば、気筒には冷却兼空気貯留装置で20℃ばかりに冷やされた大気圧より高い圧力の排気と空気との混合物が吸入され、燃焼に必要な空気は各サイクルごとにポンプによって高圧噴射され、微粒化された燃料、具体的には微粉炭と出会う。O₂ではなく空気を噴射するワケであるから、噴射量は多くなる。また、ディーゼルは排気冷却の理由については何も語っていないが、その必要性についてはやがて明らかとなる。

なお、作動流体の圧力を闇雲に増大させぬため、サイクル毎にこの新気と等しい体積のガスが冷却兼空気貯留装置から排出されねばならぬとされた。その排出ガスからは燃焼用空気の圧縮に必要な動力回生が可能であるとも主張されている。しかし、これは付け足りに過ぎず、燃焼ガスの一部を排出するのであるから、このエンジンはあくまでも擬似密閉サイクルないし再循環サイクル・ディーゼル機関として構想されていたことになる。屁理屈を唱えれば、コールド・スタートから冷却兼空気貯留装置が定常圧力に達するまでは真正密閉サイクル・ディーゼル機関として機能することになるのであろうが、ディーゼル自身の思考は再循環サイクルと区別されるべき密閉サイクルにまでは及んでいなかったようである。

前掲『合理的熱機関の理論と構造』巻末附図の「合理的熱機関」を（擬似）密閉サイク

6) これを英訳した Donkin はこれを “closed circuit” と訳し、わざわざ蒸気機関における凝結サイクルのようなモノ、という主旨の訳注を付している。cf., *Theory and Construction of a Rational Heat Motor*. p. 77.

ルないし再循環サイクル化すればその出力は例えば100PS から300PS へと向上させられる……これがディーゼルの大風呂敷であった。

2. 海軍技術研究所における基礎実験

再循環サイクル・ディーゼルに関する研究は先次大戦期, ドイツにおいて H_2O_2 を用いる密閉式蒸気タービン・プラントであるヴァルター・タービンと並んで潜水艦用動力開発の一環として推進され, 日本においても海軍技術研究所において基礎研究が進められた⁷⁾。

本節では資料的にアクセス容易な元・海軍技術研究所理学研究部員, 今泉英三 海軍機関大佐(後, 千葉工業大学教授)による密閉サイクル・ディーゼルに関する基礎研究・陸上実験について紹介する。

実験期間は1934年9月から'38年6月までの約4年間であった。典拠となる彼の博士論文は「其の一 恒容燃焼に関する研究」, 「其の二 気泡式に依る炭酸瓦斯吸収に関する研究」, 「其の三 四衝式機械に於ける実験」, 「其の四 二衝式機械に於ける実験」と「研究の総括」の4部から構成されている。また, 今泉はその経過を総括した「無空気機関の研究」なる文章も認めている⁸⁾。

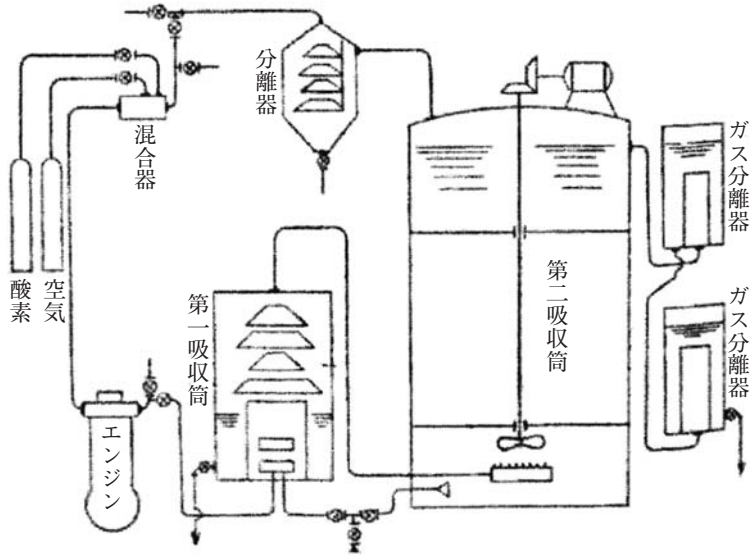
恒容燃焼に関する研究に先立って常圧下での燃焼実験が行われている。これは O_2 と CO_2 との混合気を入れたムーア炉を加熱し, 炉中に重油を滴下して発火温度を調べる実験であった。 O_2 40%にて通常大気中と同様の燃焼が可能であった。恒容燃焼とは爆発筒と呼ばれた容器を最高 $500^{\circ}C$ まで加熱しておき, その中に混合筒で調製され $450^{\circ}C$ に加熱された N_2 と O_2 と CO_2 との様々な比率の混合気を押込み, 噴射弁から1回だけ重油を吹いて着火させるという実験で, 充填ガスの初圧は絶対圧1, 5, 10, 15, 30, 40 kg/cm^2 に設定された。そして, ここでも40% O_2 -60% CO_2 付近で大気中と同様の燃焼が起こることが確認された。現在のようにガス濃度の検知が簡単ではなかったため, 排出ガス中の CO_2 濃度測定には高度な分析装置が動員された。

1935年5月より神戸製鋼所製4サイクル予燃焼室式機関(2-120×180mm, $\varepsilon=14.2$, 30HP/1000rpm.)を用いた再循環サイクル実験が開始された。この段階においては排気から CO_2 を除去する装置は未整備であった。灯油を用いて先ず, 排気+ O_2 運転実験が試みられたが運転継続に失敗, O_2 + CO_2 予混合気を用いた実験は起動そのものに失敗, 続いて重油を用いた実験が行われた。起動には成功したものの運転継続は困難であった。その後, 実験中に吸気溜の破裂を生じた。最後には2時間程度までの継続運転が可能となったが, 一貫して運転は不調で鉛板や雲母板を用いた「安全弁の爆発」は止まなかった。なお, この神鋼機関においてはピストンリングが「多数の小片に折損」する事態を防ぎ得ず, 理研

7) 緒明前掲論文, 参照。ヴァルター・タービンについてはまた, 堀 元美『潜水艦』原書房, 1973年, 233~239頁, 参照。

8) 今泉英三「内燃機関の特殊運転に関する研究」(東京帝國大學博士論文, 1941年), 参照。また, 「無空気機関の研究」『生産技術』Vol. 8 No. 77 (1953年6月)は一連の基礎実験を要領よくまとめた論考である。

図2 気泡式吸収装置とアクロ機関とを組合せた密閉サイクル・ディーゼル・ユニット



今泉「無空気機関の研究」第4図。

ピストンリングを用いても同様であった。 $\epsilon=19.4$ まで上げたり、ピストンリング背面に CO_2 を導き、背面空間での防爆措置が講じられたりしたが改善は見られなかった。機関自体の出来栄え不良は実験失敗の副次的要因であった。

そこで気泡式に依る炭酸瓦斯吸収に関する基礎研究が企図され、約2箇年がこれに費やされた。 O_2+CO_2 予混合気ではなく、排気中から CO_2 を除去して密閉サイクルを構成するというは作業物質中に N_2 を介在させるということでもあった。

CO_2 吸収液としては蒸留水、水道水、海水、 KOH 水溶液、 NaOH 水溶液、デピペリディール水溶液、エタノールアミン水溶液が試された。しかし、薬品を用いて吸収性能を挙げても爾後、これが容易に再生 (CO_2 を環境中に排出) 可能となっていなければ実用性に欠けるため、運用段階では海水を使用するのが便利との判断から水道水が主として実験材料となった。また、化学プラントを真似たコークス又は「ラッシヒスリング」(Raschigring: ラシヒリング? 円筒状充填物) を用いる水洗式^{シャワー}吸収装置も試されたが、 CO_2 分離性能が思わしくなく、これは棄却された。

1936年5月、気泡式吸収装置と4サイクル・ディーゼルとを組合せた密閉サイクル実験(図2)が開始され、'38年5月まで各種実験が繰広げられると共に吸収筒のコンパクト化、電動機に依る攪拌の省略が志向され成功を見た。供試機関はアクロ空気室式4サイクル(久保田[現・株]クボタ)による国産品か輸出品か不明 1-125×174mm, $\epsilon=15.5$, 10HP/750rpm., 12HP/900rpm.) であった。今泉は実験では通常運転以上の出力, 11HP/750rpm. がマークされたと述べている。これは「通常」時の充填効率が余程、低かったための珍事であろう。

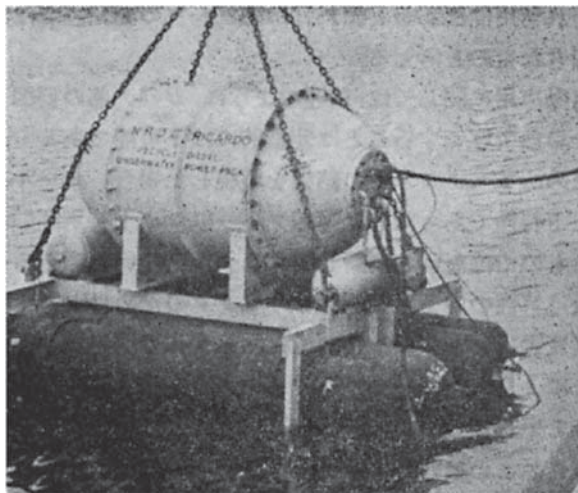
1937年7月から'38年6月にかけては2サイクル・ディーゼルによる実験研究が行われた。その供試機関は阪神鐵工所（現・阪神内燃機工業㈱）製2サイクル直噴機関（1-150×270mm，20HP/500rpm.， $\epsilon=15$ ）であった。掃気が35～40% CO₂，35～50% O₂（残余はN₂）に保たれておれば，起動～運転は安定していた。

然しながら，この悠長な実験研究は戦時体制への傾斜の中で閑却されてしまった。緒明前掲論文に拠れば，同じ方面の研究は戦後，アメリカや日本でも再開されたが，何れも大成することなく，とりわけ戦勝国においては原子力潜水艦の発達を前にしてヴァルター機関共々，その存在感を喪失して行った。

3. Ricardo の提案

ところが，1971年に至り，イギリスの Ricardo and Co. Engineers Ltd.（現 Ricardo plc）は潜水用35HP 再循環サイクル・ディーゼル・パッケージを公開実験に供した（図3）。この全備重量約8トンのユニットは商業的に入手可能な世界初の潜水用全装備動力装置であると伝えられた。この装置によって海底作業機器用に圧縮空気，電力，油圧動力等を母船から供給する長大なケーブルの類は，一定時間ではあるが，不要となるという触れ込みであった⁹⁾。

図3 Ricardo の再循環サイクル・ディーゼル機関ユニット



『内燃機関』Vol. 11 No. 121 1972年3月，34頁，図-1。

また，この装置については潜水調査船の推進動力としての可能性も主張された。当時のライヴァル技術は鉛酸電池であった。本装置の採用は潜水調査船の行動範囲と潜航時間を

9) cf., *The Motor Ship*, Dec., 1971, p. 404. (『内燃機関』Vol. 11 No. 121 1972年3月，33～34頁)，岡村健二「注目されるリカードの海底作業用機関」『内燃機関』Vol. 12 No. 133 1973年1月，21頁。

飛躍的に増大させるものと期待された。

使用されたディーゼル機関はCaterpillar D3-152 機関（その子会社、Perkins 製：直噴、3-91.5×127mm, 2.5ℓ, 35HP/2000 rpm.）であり¹⁰⁾、再循環サイクルは排気の一部を再循環させ、これにディーゼル案におけるような空気ではなく純 O₂ を加えて燃焼を継続させるシステムとして構成されていた。架台上にセットされたエンジン・カプセルと呼ばれる圧力容器は水深180m までの耐圧性を有し、その内容積は100 HP までの機関を収容可能であった。燃料と酸素を収容するボンベは架台下部の空間に収められていた。

公開実験においては最大出力での12時間運転に十分な113.6ℓの燃料と4本の酸素ボンベが装備され、その全備重量は上述の通り約8トンに達したが、架台は低圧タイヤで支持されていたから装置全体の陸上での移動は比較的容易であった。

主機は海面上では大気から吸気するが、切替え装置によって簡単に再循環サイクルへの転換がなされた。潜水時における始動は空気運転で行われ、約10秒後、再循環サイクルへの自動切り替えが行われた。

再循環サイクル運転において排出ガスは海水で冷却され、凝結した水は分離除去された。これが行われたのは水蒸気 H₂O の比熱比が1.33, N₂ のそれが1.40であるため、前者の割合が増すと任せていると燃焼ガス全体のポリトロプ指数が低下し、圧縮圧、圧縮温度が低下して燃焼不良と燃費悪化が招来されるからである

その後、排気の一部は給気圧0.35 kg/cm² が保たれるように再循環に回され、残余は可変速油圧モータに依って駆動される圧縮機で加圧された上、カプセルから排出された。従って、これはディーゼルのその如き疑似密閉＝再循環サイクルということになるが、水深180m での稼働状態における圧縮機駆動損失は5HP、即ち機関発生出力の約15%にも達した。

なお、再循環サイクルにおいてはサイクル数が累加するほどに作動流体中に占める CO₂ の割合が漸増する (N₂ のそれが漸減する)。CO₂ の比熱比1.29は N₂ のそれに比して小さいため、CO₂ の割合が増せば上に観た H₂O のケースと同様、圧縮圧・温度の低下を来し燃料の着火が困難となる。これを補う目的で給気温度は約100℃に保たれ、その熱源として給気への微量の未冷却排気の混合が行われた。これではしかし、充填効率はガタ落ちとなる。

なお、この程度の給気加熱を行っても、O₂ 濃度は大気中のその1.5倍から2.0倍に近い値に設定されねばならなかったと考えられる。O₂ 計量弁の開閉は列型噴射ポンプを用いた油圧作動方式に依っていたが、O₂ 混入量の正確な制御が困難であったため、公開実験は定速運転で実施され、可変速運転は将来的な課題とされた。機関出力の取出しは油圧に依っており、クランク軸は吐出圧210 kg/cm² の油圧ポンプを駆動した。

冷却水ポンプや排出用圧縮機駆動油圧モータをはじめ補機類の駆動はベルトに依っており、安全装置としては潤滑油圧力の低下、機関回転数の異常、カプセル内 O₂ 濃度の過昇

10) 同系パーキンス機関はヤンマーディーゼルにおいても製品化されていた。

を感知すれば機関を緊急停止させるシステムが備えられていた。

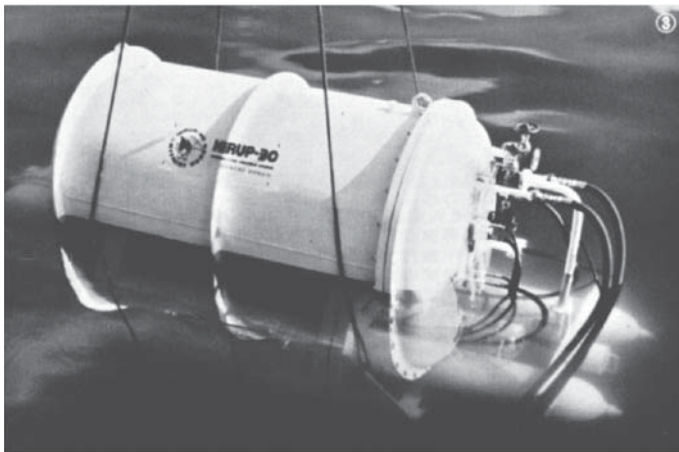
CO₂ を作動流体とする再循環システムの採用により本来，50 HP の最大出力を有する本機関の性能は大幅な低下を来していた。燃費は通常使用状態より10%悪化し，排出ガスを使い続けるため，サービス寿命は半分以下への短縮を余儀無くされた。

この装置のその後の発展については管見の限りではない。恐らく水面下での開発が継続されたのであろうが，かく述べたところで言葉遊びにしかない。

4. 日立造船の提案

日立造船(株)は1975年，リカートの装置を踏襲したような水中動力用ディーゼル発電ユニット，リサイクル・ディーゼル機関 HIRUP-30 (油圧出力) 及び HIRUP-30E (電気出力) を発表し，後者は延べ210日，総リサイクル運転時間108時間を達成し，その一部にはこの年の10月に実施された水深100 m での試験運転……海底沈設200時間，運転回数5回，運転時間3.5時間……が含まれていた (図4，5)。

図4 日立造船 HIRUP-30E の実験風景

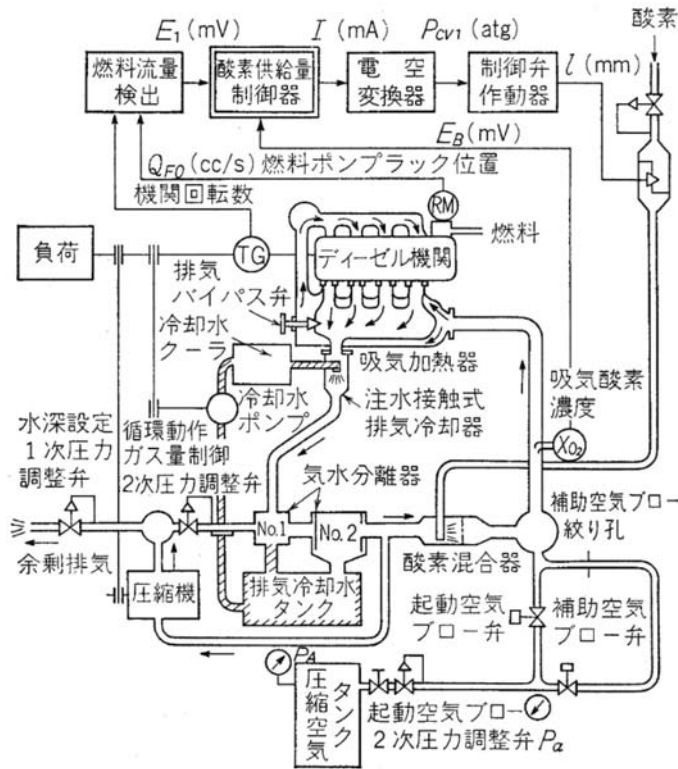


『内燃機関』Vol. 19 No. 235 1980年4月，巻頭グラヴィア。

この12時間連続定格運転可能なユニットの全備重量はリカートのユニットのそのの2倍を超える約17トン程度であったようである。再循環運転時における機関の正味出力は30 PS，油圧出力22 PS (16 kW)，発電出力16 kWであった。更に，日立造船は CO₂ 吸収装置を組み込んだ密閉サイクル・ユニットの実験をも進めた (図6)¹¹⁾。

11) 永井 将・浅田忠敬「リサイクルおよび密閉サイクルディーゼル機関の研究 (第1報 熱力学的解析)」，永井・浅田・山川政志・常次正和・三輪一仁「同 (第2報 リサイクルディーゼル機関の性能)」，永井・浅田・平野進作・山川「同 (第3報 リサイクルディーゼル機関の性能)」『日本機械学会論文集』第44巻 第386号，1978年10月，3543～3574頁，永井・浅田・平野・松本通雄「リサイクルおよび密閉サイクルディーゼル機関の研究」『内燃機関』Vol. 19 No. 235 1980年4月，巻頭グラヴィア，19～31頁，参照。ユニットの全備重量についてはグラヴィアの解説から推定。

図5 日立造船リサイクル・ディーゼル機関システム



永井・浅田・平野・松本「リサイクルおよび密閉サイクルディーゼル機関の研究」図-11。

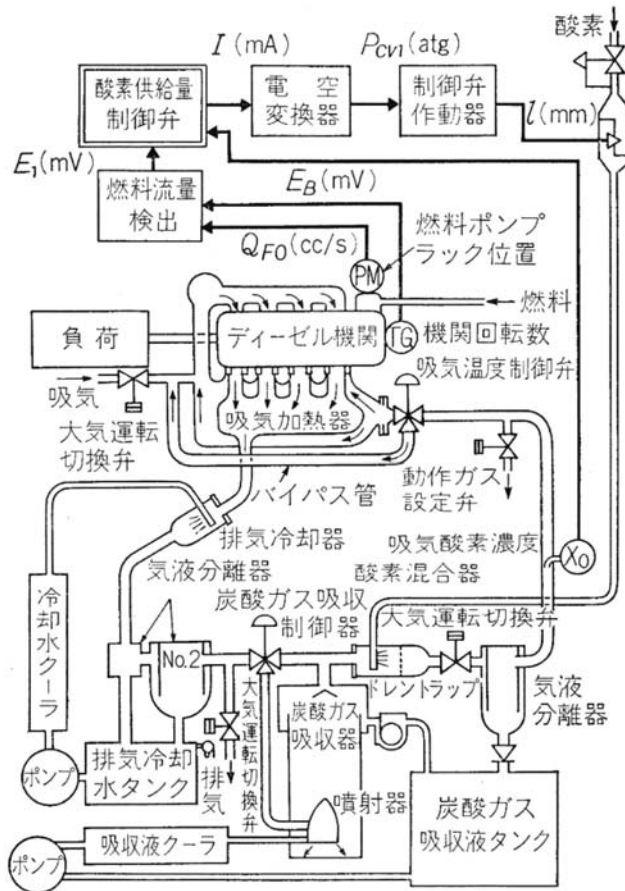
これらに用いられたディーゼル機関は当初は渦流室式機関で、後に直噴機関へと変更された。この直噴機関については4L-92×98mm、 $\varepsilon=18.7$ の水冷機関としか公表されていない。寸法的に国産品なら(株)小松製作所の4D92がこれに該当する。その本来の ε は出現当時17.0、日立造船での実験当時なら18.5であったが、日立造船においては古い17.0のモノのピストン冠キャビティーに上げ底を施して $\varepsilon=18.7$ を得るといふ工夫が為されていた¹²⁾。

リサイクル運転において機関性能が大幅に低下したのは理論が教える通りであった。もっとも、燃焼最高温度も燃焼最高圧力も抑えられる上、作動流体に N_2 がほとんど含まれないため、 NO_x 発生量は通常空気運転より遥かに少なく、 O_2 濃度が高く制御されているため黒煙濃度も低かった。

日立造船の密閉サイクル・ディーゼル研究は解析的研究のみならず、実機ユニットによる陸上運転試験にまで及んだ。最適な CO_2 吸収剤が探究され、モノエタノールアミン

12) 4D92の初登場は『内燃機関』Vol.11 No.118, 1972年1月, の「1972国産エンジン諸元表」であり、この表における $\varepsilon=17.0$ 、その値は『73国産エンジンデータブック』で18.5となっており、最終掲載の『81国産エンジンデータブック』の4D92-1まで18.5のままであった。

図6 日立造船密閉サイクル・ディーゼル機関システム



同上, 図-18。

(MEA) の40%水溶液が見出された。この水溶液は再生使用可能であった。

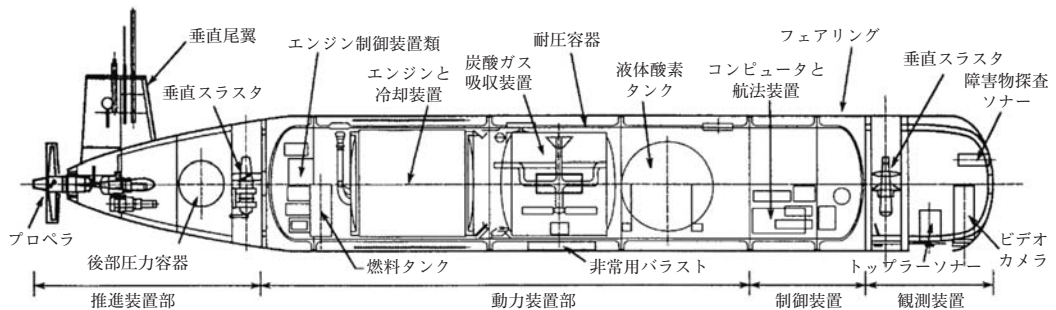
密閉サイクルにおいてはCO₂吸収率が高いほど通常の空気運転に近い図示熱効率が得られる。給気加熱を行う必要は無く充填効率を高く取れるから出力の値も大きい。但し、補機駆動損失が再循環サイクル、とりわけ大深度におけるそれより遥かに少ないとは言え、通常運転時よりは多く計上されねばならぬため正味熱効率ではこれより劣ることになる。

また、排気性状はNO_xがリサイクル・ディーゼルの10倍近く、空気運転の約1/2、排気黒煙濃度は同一**bmep**における空気運転の約1/4であった。

なお、日立造船においてはN₂より比熱比の大きいAr (1.65), He (1.66)といった不活性ガスを用いる高効率密閉サイクルやH₂・O₂機関の可能性についても理論的に検討された。しかし、爾後における日立造船リサイクルおよび密閉サイクルディーゼル機関の開発経過について筆者は寡聞にして承知していない。

5. 三井造船 *R-one*

その後、と言うのも時の隔たりの大きさを想えば我ながら無責任な口上ではあるが、三井造船(株)と東京大学生産技術研究所によって海洋調査用自律航行ロボット AUV (Autonomous Underwater Vehicle), *R-one* が三井造船玉野事業所にて開発された(図7)¹³⁾。

図7 三井造船 *R-one*

浦・小原 [1997] 図1。

その開発着手は1990年であったが、同社は1989年、日本船用機器開発協会と共同で鉛酸電池に対抗すべき密閉サイクル・ディーゼル開発を初めていた。三井造船ではこれをCCDE (Closed Circuit Diesel Engine) と称したが、要するに密閉サイクル・ディーゼルである。この時に使用された機関は三井 KHD BA6M816 型水冷予燃焼室式機関 (6L-142×160 mm [15.2ℓ], $\epsilon=16$, 定格出力465 PS [350 kW]/1800 rpm., 全備乾燥重量1800 kg) であった。文献はその定格出力について300 kW/1800 rpm. と表記しているが、これは船用の連続定格出力であろう。密閉サイクルでの定格出力は235 kW に落とされていた。稼働水深は450 m, 稼働時間は非常に長く、200時間と設定されていた。

その試験成果を踏まえて *R-one* 用に開発された密閉サイクル・ディーゼル・ユニットは格段の小形化の末、直径1 m, 長さ4 mの円筒形カプセル入り発電ユニットとして具体化し、R. ディーゼルの原初的なアイデアから一世紀後に当たる1993年5月25日には公開実験に供された。

そこで用いられた機関について文献にはヤンマーの3TN66E とある。末尾のEの意味は不詳ながら、3TN66なら渦流室式、水冷3L-66×64.2 mm [0.66ℓ], $\epsilon=23$, 定格出力15 PS/3600 rpm., 過負荷定格出力16.5 PS/3600 rpm., 全備乾燥重量75 kg という小形機関で

13) *R-one* については浦 環・小原敬史「閉鎖式ディーゼルエンジン・システムを搭載した AUV『オールワン・ロボット』の田辺市沖の自律潜航」『日本造船学会誌』第812号, 1997年2月, 31~36頁, 大田孝則・小原敬史・松嶋正和・前田伸一・浦 環「閉鎖式ディーゼル機関を搭載した自律航行型無人探査機『オールワン・ロボット』の開発」『三井造船技報』第161号, 1997年6月, 1~6頁, 「自立航行型海中探査ロボット『オールワン・ロボット』」『日本機械学会 交通・物流部門ニュースレター No. 15』1998年3月23日, 参照。

ある。これを主機とする密閉サイクル・ディーゼル発電ユニットの定格出力は僅か 5kW であった。12時間フル稼働した場合の電源容量は60kWh ということになる。

開発されたユニットの密閉サイクル運転時間はリカードや日立造船における先行例の 2 倍に当たる公称24時間に延長されていた。公開の際、海中ロボット用密閉サイクル・ディーゼルはこれが世界初と形容されたから、リカードや日立造船の開発は少なくとも自律航行する潜水艇用動力という形では結実していなかったということになる。*R-one* における吸収剤は KOH の水溶液であったが、純 O₂ の添加 (27%) という点は定石通りであった (『朝日新聞』1993年 5月26日)。

これを直径1150mm, 全長約8270mm の艇体に艤装しての潜航実験は1996年 8月 9日に初めて実施された。慣性航法装置により24時間ないし120km 自律航行可能な *R-one* の最大潜航深度は400m, 深度制御精度±10cm, 主電動機出力は1.5kW, 最大推力50kg, 潜航最大速度は3.6kt. であった。その総重量が僅か4.35トンであった点からも上記の先行例と比べて格段の小形軽量化が成就されていたことが判る。8月23日にはその公開実験が実施された。なお、この段階において確認された連続潜航時間は24時間ではなく 4時間であり、引続き構成部品の耐久性向上の手が打たれて行った。

この時点において存在した海外の自立航行型ロボットはそれだけで 2~3 億円もかかる高価な、しかも50回ほどしか充電出来ない銀亜鉛電池を用いていたため、その用途が限られていた。これに対して *R-one* の密閉サイクル・ディーゼル・ユニットは既成のディーゼル機関と軽油を用いるモノであったためイニシアルコストもランニングコストも低かった (『朝日新聞』1996年 8月10日, 24日, 28日)。

1998年 6月19日には12時間を超える連続潜航実験成功が報じられ、'99年から八丈島南方の海底火山等の実地観測への目途が立てられた (同, 1998年 6月22日)。

その後、*R-one* は多くの実地観測に使用され成果を挙げた。密閉サイクル・ディーゼルは燃料残量によって残存航続時間が容易に把握出来、出力電圧が安定している。それらは二次電池に対して密閉サイクル・ディーゼルが主張し得る大きなメリットであった。

然しながら、電池の進化も急であり、2000年 1月には三菱重工業神戸造船所において海洋開発技術センター向けに Li イオン電池を用いる自立型無人潜水機のプロトタイプ、*AUV-EX1* が完成した。また、これに燃料電池を用いる計画も推進されていた。三井造船自身も2003年 7月、Li イオン電池を用いる次世代 AUV, *r2D4* を投入した。かくして、水中動力用にエアレス=密閉サイクル&疑似ゼロ・エミッション動力を実現しようとするれば、密閉サイクル・ディーゼルよりも電池の方が有利という時代の到来が告げられた¹⁴⁾。

むすびにかえて

内燃機関は蒸気原動機を手本として生まれ、密閉サイクル、複動、複式・多段膨張、ター

14) 「環境負荷低減型の船用エネルギー (燃料電池)」『日本機械学会 交通・物流部門ニューズレター No. 19』2000年 3月17日, 小原敬史「アールワン・ロボットから r2D4 へ」『日本造船学会誌』第883号, 2005年 1月, 42~47頁, 参照。

ボ・コンパウンドといった後者で成功した手口を取入れようとしては幾度も蹉跌を重ねて来た。複動における稀な成功例は19世紀末から20世紀初頭にかけて栄えたマンモス・ガス機関や両大戦間期の船用複動ディーゼルに見出されるが、それぞれ蒸気タービンや単動ディーゼルにアッサリと途を譲っている¹⁵⁾。

レシプロ内燃オンリーでの複式化の成功例は皆無と言って良く、内燃機関における多段膨張化の成功例は戦後一時期幅を利かせた航空発動機におけるターボ・コンパウンドや現代の船用大形2サイクル・ディーゼル機関あるいは4サイクル船用中型ディーゼル機関の排気ガスタービン過給におけるポンピング・ゲイン、一部のディーゼル機関において実用化されているパワー・タービンに見出されるのみである。

それらに比して一層かつ一向にはかばかしくないのが密閉サイクルである。ディーゼルといふ外燃機関であるスターリングといい、蒸気の凝結による T_2 の降下という荒業が効かぬとあってはそれも半ば当然の報いであろう。

また、密閉サイクル・ディーゼル不振に係わる今一つの要因として挙げられるべきは、その実用性がライヴァルたる電池の発達レベルと逆相関せざるを得ないという事実である。要するに、今や疑似ゼロ・エミッション・ベースでのそのコスト・パフォーマンスは発達した二次電池 (Liイオン電池) や燃料電池にも劣るワケである。

密閉サイクル・ディーゼルの研究開発を通じて得られた教訓を敷衍すれば、第1は、そもそも内燃機関なる原動機は空気をタダで呼吸し相当程度の環境負荷を垂れ流す軽犯罪的行為を重ねぬ限り、経済的に有利な形で動力を発生させ続けられないカラクリであるという大局的判定が得られたこと。CO₂ に因る温暖化説は相当なマユツバながら、この判定は温暖化説とは無関係に真である。

第2は、タダで手に入る空気の主成分をなし、燃焼においては傍観者である以上に汚染物質 NO_x の生成源という点に絡んで悪役専業視されがちとなって久しい2原子分子ガス N₂ が内燃機関にとって実は極めて有効な、それこそかけがえの無い作動流体要素であったという物理的命題が改めて確認されたこと。これを、熱機関、とりわけ内燃機関が背負わされている原罪に眼が向けられたと言い換えても良い。

VW やダイムラーベンツ、R. ボッシュ総絡みのディーゼル・スキャンダルを通じて炙り出されたように、知恵は悪知恵とそれほど綺麗サッパリ隔離・絶縁され得ぬモノである。然しながら、以上2つの命題に係わる具体的データの採取を通じた真摯な事実究明こそは密閉サイクル・ディーゼル開発の最も大きな技術史的功績である。

内燃機関の稼働に因る環境負荷の発生原単位を人智のみでゼロ近傍に圧縮するなどというワザは産業技術として (経済原則の制約下で) そう容易く成就せしめられ得るものでは

15) 蒸気原動機については差当り拙稿「蒸気動力技術略史」、船用蒸気機関におけるターボ・コンパウンドについては「浦賀船用聯動汽機 2DC 型について」、マンモス・ガス機関や複動ディーゼルについては「三井鉾山 三池ならびに田川瓦斯発電所について (訂正補足版)」、戦時日本の中速・大形高速ディーゼル：艦本式、横須賀工廠機関実験部式、新潟鐵工所、三菱神戸造船所 (何れも大阪市立大学学術機関リポジトリ掲載)、参照。

ない。内燃機関を通じたエネルギーの過剰利用という罪状に対する執行猶予判決を漫然と期待する一方，ナノ粒子という厄介な問題については相変わらず留保を決め込み，あるいはその対極において温暖化説を煽り電気が全能の救世主たり得るかのように騙るが如き指導層の挙動もまた楽観的ないし無責任に過ぎる。重要なのは平易な命題を素直に受け止める理性である。