システム技術開発調査研究

２０－Ｒ－１３

新・水圧技術（ADS:Aqua-Drive-System）を用いたロボティクスの新基軸応用に関する調査研究

報　告　書

平成２１年３月

財団法人 機械システム振興協会

委託先　社団法人 日本フルードパワー工業会

KEIRIN

この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。
URL：http://ringring-keirin.jp/

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人機械システム振興協会では、財団法人ＪＫＡから機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムに関する調査研究等補助事業、新機械システム普及促進補助事業を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 東京大学　名誉教授 藤正 巖氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を実施しております。

この「新・水圧技術(ADS：Aqua-Drive-System)を用いたロボティクスの新基軸応用に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が社団法人日本フルードパワー工業会に委託して実施した調査研究の成果であります。今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いであります。

平成２１年３月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

この報告書は、財団法人 機械システム振興協会の委託による「新・水圧技術(ADS：Aqua-Drive-System) を用いたロボティクスの新基軸応用に関する調査研究」の成果報告である。

前世紀末に、21 世紀に解決を委ねざるを得ない人類共有の課題として、地球環境の保全、資源有限への対応、それに食糧の確保が指摘され、有識者のおおよその合意が得られた。これらの課題には相互に関連する部分も多く、その掘り下げた検討から、エネルギー消費に伴う二酸化炭素の削減が、いわゆる地球温暖化に関連して、喫緊の課題と認識され今日に至っている。

当工業会としても、社会の二酸化炭素の削減、環境調和及び省エネルギーに貢献可能な技術を提供していかなければならないと思料する。したがって、圧力流体を媒体とした制御性に優れたエネルギー伝達、換言すれば、基盤技術と定義できる流体駆動を扱うその技術的役割から、持続的に発展可能な流体エネルギー活用技術、二酸化炭素排出を削減できる省エネルギー技術の開発にむけて、鋭意努力をしているところである。例えば、水道水や清水をエネルギー伝達媒体とした新・水圧技術（ADS）の提案が、その主要なものの一つである。

本調査研究は、当工業会が培ってきた新・水圧技術（ADS）を、発電プロセスや大規模工場における排熱・蒸気・復水の一部を有効に利用すること、新たな用途への展開の可能性を調査することを目的としたものである。更に、この成果を広く一般産業等の分野で使用される機器、機械及びそれらの総合システムに適用できれば、現に我々が直面している上述の課題の解決に寄与できると考える。調査研究の具体的な対象は、次の２事項である。

（１）一次側エネルギー分野（火力発電・原子力発電、水力、風力や太陽光、小落差・小水量利用のマイクロ発電などのエコ発電等）での ADS 導入の必要性と可能性

（２）発電プラントに加え、一般産業等の分野での使用をも包含した ADS「ロボティクスの駆動と制御」の適用と有効性

フルードパワーの新たな挑戦を認識する参考となることを願い、この報告書を高覧に供する次第である。

最後になりますが、経済産業省並びに社団法人機械システム振興協会はじめ関係各位のご尽力に謝意を表す。

平成２１年３月

社団法人　日本フルードパワー工業会

目　　次

序
はじめに
１．調査研究の目的 1
２．調査研究の実施体制 3

第１章　一次側エネルギー分野での ADS 導入の必要性と可能性を調査 6
１．１　新・水圧技術(ADS:Aqua-Drive-System)の従来型エネルギー発生システムへの応用 6
　１．１．１　石炭火力における課題と必要性 8
　１．１．２　LNG 火力における課題と必要性 11
　１．１．４　ADS 導入に向けての可能性 16
１．２　新・水圧技術（ＡＤＳ）の環境対応エネルギーシステムへの応用 20
　１．２．１　水力発電 20
　１．２．２　風力発電 22
　１．２．３　太陽光発電 23
　１．２．４　波力発電 24
　１．２．５　まとめ 25
１．３　新・水圧技術（ADS）を利用した二次側エネルギー消費システムへの展望 25

第２章　新・水圧技術（ADS）の基盤技術となる「ロボティクス技術」調査 29
２．１　水圧機器－シリンダ、モータ、バルブ、アキュムレータ、シール･パッキン等々－ 29
　２．１．１　調査方法 29
　２．１．２　調査対象とする機器の基本的仕様 30
　２．１．３　水圧機器の調査結果 31
　２．１．４　調査結果のまとめと今後の課題 35
２．２　システムと制御 37
　２．２．１　発電所内及び一般産業用機械における ADS ロボティクス利用の有効性 37
　２．２．２　制御仕様 37
　２．２．３　制御系設計 38
　　２．２．３．１　サーボ系の制御 38
　　２．２．３．２　水圧サーボシリンダ制御 42
　　２．２．３．３　水圧サーボモータ制御 46
　２．２．４　水圧システム及び制御の世界的研究動向 50
　２．２．５　実用化における課題 50
　２．２．６　まとめ 51

第３章　環境、省エネルギー技術の視点に立ったADS応用の展望 53
３．１　熱の利用形態 53
３．２　工場排熱の調査 55
３．３　熱質の調査 61
３．４　蒸気の駆動源としての応用調査 63
３．５　新・水圧技術（ADS:Aqua-Drive-System）の特徴について 68
３．５．１　ＡＤＳの新規性・独自性 68
３．５．２　ADSのコスト要因の考え方 73

第４章　調査研究の成果のまとめ 75
４．１　一次側エネルギー分野でのADS導入の必要性と可能性を調査 75
４．２　一次側、二次側共通応用技術であるADS「ロボティクスの駆動と制御」の適用と有効性の調査 77
４．３　環境、省エネルギー化技術の視点に立ったADS応用の展望 80

第５章　調査研究の今後の課題及び展開 83
５．１　今後の課題 83
５．２　今後の展開 85

あとがき 86

１．調査研究の目的

地球温暖化対策に関する議論が日毎に高まっている。環境問題解決は経済発展と二律背反の関係に位置する。そこから脱出するためには具体的施策を持って解決されねばならず、人類が初めて経験するグローバル的難問である。しかも、その解決は急務であり、その対策は従来の延長線上にはない大きなパラダイム変化を伴う解決策でなくては乗り越えることができないし、大きな社会システムの変換を伴うことになる。また、問題解決のための具体的指標は二酸化炭素の削減であるとされ、排出量と吸収量のバランスが今やその比が２：１といわれており、地球温暖化の勢いは衰えていないのが現状である。

二酸化炭素の発生は、発電が約 4 割、鉄鋼が 1 割、自動車を中心とする輸送が約 2 割、家庭やオフィスなどの民生が約 1.5 割で 8 割以上がこの 4 つの分野による、とされる。経済産業省は 2005 年に二酸化炭素排出半減のための 21 の革新技術を提案した。また昨年 10 月には「STS（社会の中の科学技術）フォーラム」（世界から科学技術者、企業経営者 600 人が集まり、環境問題など人類共通の課題を討議する国際会議）が京都で開催された。ここでも世界の参加者は「温暖化は喫緊の課題。二酸化炭素排出削減には、エネルギー技術の革新が不可欠」との見方で一致した。具体的には太陽電池や省エネルギー、原子力、二酸化炭素の回収・貯蔵技術など広い分野で「イノベーションが欠かせない」と報告された。振り返って、エネルギー資源の乏しいわが国にとって、世界的な石油価格の高騰、その対策から端を発する食料の異常なコスト上昇の中でエネルギーの安定供給と経済発展の要素は重要であり、さらに「環境保全」の加わった３つの課題を同時に解決すべきソリューションは何か、を見出さねばならない。

一方「環境にやさしい」社会の構築が叫ばれてから久しく時間が経過し、現在ではそれが「地球環境、温暖化防止」となり、その対策は「低炭素社会」と明記された。その実現に向けグローバル化の中で日本はその活路を見出すべく躍起となっている。環境立国、モノ作り大国を標榜し、中でも「省エネルギー技術」は世界でも群を抜いているとさえ言われている。しかし、環境対策において規制はできたが、実際は余裕があったら対応するような状況ですらある。日本国は資源がない。世界の環境対策は著しい勢いで迫っていることも認識しなければならない。

本調査研究で提案する「新・水圧技術：ADS（Aqua–Drive- System）」は、作動流体に「清水」を応用する機械・装置の駆動・制御技術である。それ故に発電プロセスでできる復水を作動流体として利用することが可能である。したがって、発電プロセスのタービン系や各種付帯設備の駆動・制御に油圧や電気を使用することなく直接 ADS を導入することにより水の有効利用と環境、省エネルギー、省資源に寄与できる。ADS は、電動のような漏電や防水・防滴の適用規格対象外にあり、空気圧のような低剛性による制御上の課題やオイルミストなどの油成分は存在せず、油圧技術と同じ液圧技術であるが、油圧の小型、高密度出力、高応答特性の特性を持ちながらも完全オイルフリーなる特長を持っている。

北欧の発電所では環境と水の有効利用の観点から発電システム駆動・制御等に ADS が採用されている例がある。この考え方を更に水平展開し、火力発電設備とその周辺設備への ADS 技術の適用に期待できる。また、エネルギーを消費する生産活動においても ADS の小型、高速、高出力特性に加えて、安全・衛生、クリーン性を特長とする「水」という社会的インフラの利用することから「環境、省エネ、省資源」及び「水の有効利用」にも

寄与することは自明である。したがって、一次エネルギー側の火力発電等の設備とその周辺設備へのADS技術の適用及び電気エネルギーを消費する一般産業等の分野で使用される機器、機械やそれらの総合システムへのADS導入の必要性と適用の可能性についてそれぞれ調査研究することを目的とする。

注１．本調査研究報告書に記載する用語の定義

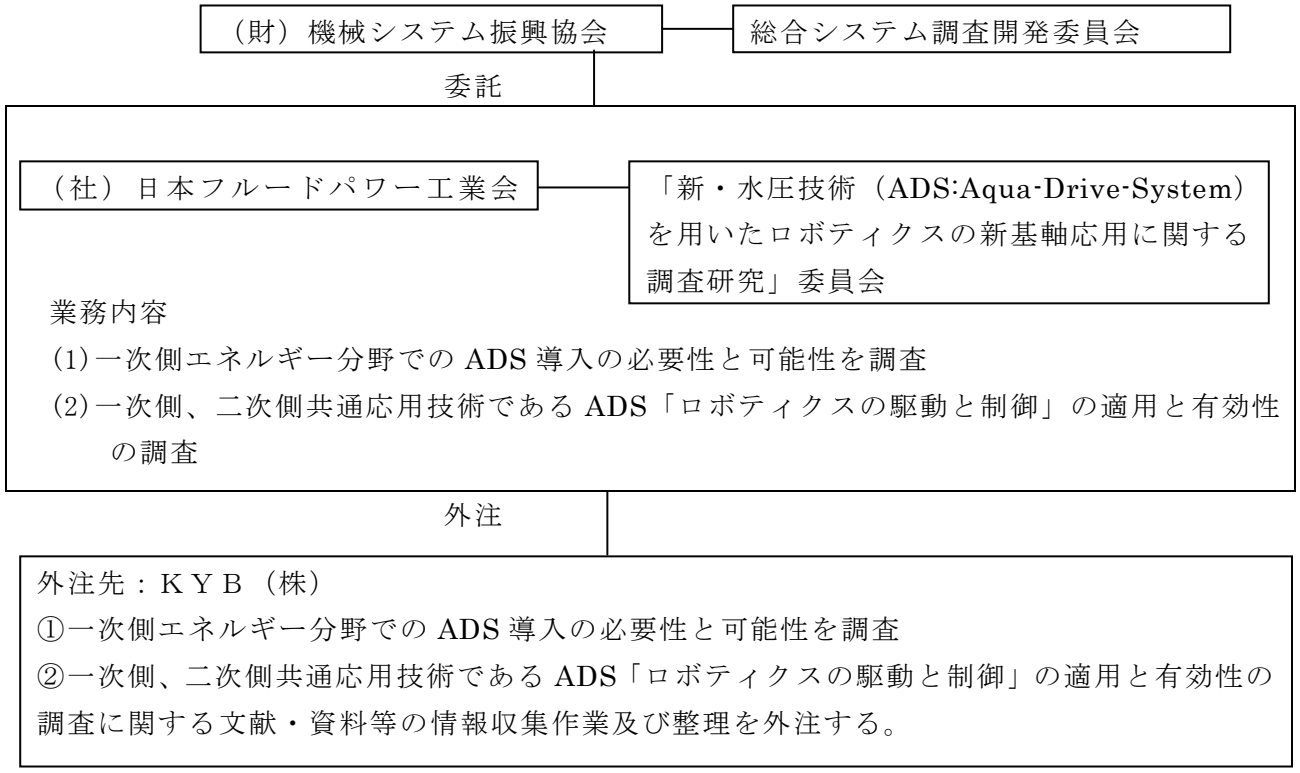
一次側エネルギー分野とは、石油、石炭、原子力、水力、地熱、太陽熱発電等をいい、二次側エネルギー（二次側エネルギー消費）分野とは輸送、生産、オフィス・家庭などの機器、機械やそれらの総合システムで使用するエネルギーを言う。

注２．ADSロボティクスとは、負荷条件や運転条件にかかわらず目標とする位置、速度、力などに自動的に追従する小型、高速、高精度のADSサーボシステムをADSロボティクスと称する。

２．調査研究の実施体制

（１）実施体制(委員会の設置等)

（財）機械システム振興協会内に総合システム調査開発委員会が設置され、また（社）日本フルードパワー工業会内に学識経験者を中心として、水圧機器、システム製造者を中心に委員会を設置し、実施計画の詳細立案と審議を行い、外部電力会社等使用者側の協力・アドバイスを得て推進した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

（順不同・敬称略）

委員長	東京大学 名誉教授	藤　正　巖
委　員	埼玉大学 総合研究機構 教授	太　田　公　廣
委　員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 研究部門長	金　丸　正　剛
委　員	独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター 招聘研究員	志　村　洋　文
委　員	東北大学 工学研究科 教授	中　島　一　郎
委　員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣　田　　薫
委　員	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	藤　岡　健　彦
委　員	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授	大　和　裕　幸

「新・水圧技術（ADS:Aqua-Drive-System）を用いたロボティクスの新基軸応用に関する調査研究」委員会

委　員　構　成

氏　　名	会　　社	部　　署・役　　職
山口　　惇	横浜国立大学	名誉教授・工学博士
北川　　能	東京工業大学	大学院・教授・工学博士
池尾　　茂	上智大学	理工学部機能創造理工学科・地球環境学研究科 教授・工学博士
大島　　茂	沼津工業高等専門学校	制御情報工学科・教授・工学博士
伊藤　和寿	鳥取大学	大学院工学研究科機械宇宙工学専攻機械工学講座 准教授・工学博士
宮川　新平	ＫＹＢ（株）	技術・生産本部基盤技術研究所 水圧システムグループグループ長・工学博士
小西　康夫	（株）ｶﾜｻｷﾌﾟﾚｼｼﾞｮﾝﾏｼﾅﾘ	技術総括部機器技術部・主事
吉田　太志	ＫＹＢ（株）	技術･生産本部基盤技術研究所水圧システムグループ
井口　　務	廣瀬バルブ工業（株）	技術管理部・技術・開発課・課長補佐
斉藤　理人	日本アキュムレータ（株）	技術部・部長代理
大久保俊克	（株）阪上製作所	技術本部・設計第二部・部長
井上　　守	（株）堀内機械	技術部・部長
村上　康裕	（株）村上製作所	専務取締役
事務局 三浦　吉成	（社）日本ﾌﾙｰﾄﾞﾊﾟﾜｰ工業会	第一技術部・部長

第１章　一次側エネルギー分野での ADS 導入の必要性と可能性を調査

エネルギー白書 2008 年版によれば、わが国において 2006 年度に使用されたエネルギーは 22.70×10^{18}W であり、その内訳は石油 44.1%、石炭 21.2%、天然ガス 16.5%、原子力 11.7%、水力 3.4%、新エネルギー3.1%で、化石燃料が合計で全体の 81.8%を占めている。この 22.70×10^{18}W のエネルギーの約 40%が発電に使用されているが、その効率は約 40%で、60%は損失となっている。また、地球温暖化の一因である二酸化炭素の発生量の 40%が発電に起因するといわれており、発電の高効率化が強く求められている。

本章においては、一次側エネルギー分野（火力、原子力、水力、エコ発電など）における ADS 導入の必要性と適用の可能性及び ADS ロボティクスの適用と有効性について調査研究する。一次側エネルギー分野には、火力、原子力発電の他自然の力を利用する水力、風力や太陽光、小落差・小水量利用のマイクロ発電などのエコ発電がある。ここでは前二者の火力、原子力において水、蒸気に基づく機械システム発電装置と排熱利用に対しての ADS 導入の必要性と可能性を調査する。また、後者の水力、エコ発電においては自然環境への適応性と水資源の有効的利用からの ADS 導入の必要性と可能性を調査する。あわせて、一次側で発生させたエネルギーを消費する二次側エネルギー分野（輸送、生産、オフィス・家庭などで使用される機器、機械やそれらの総合システム）における ADS 応用の可能性についての展望を行う。

１．１　新・水圧技術(ADS:Aqua-Drive-System)の従来型エネルギー発生システムへの応用

エネルギー白書 2007 年版によれば、わが国の一次エネルギー総供給量 $22,324\times10^{15}$J の 41%を電力用に使用しているが、変換損失及び送配電損失が 62%あり、実際に電力として使用されているのは $3,405\times10^{15}$J となっており（図 1.1.1 参照）、変換損失をいかにして減らすかが大きな課題となっている。

図 1.1.2 はわが国におけるエネルギー源別の発電電力量の推移を示している。石炭火力、LNG 火力の割合が増えてきており、2005 年度では発電電力量の 26%が石炭火力、24%が LNG 火力、11%が石油火力と化石燃料を使用する火力発電となっている[1]。その理由は、環境性（LNG からの二酸化炭素発生量は石炭に比べて 40%少ない）及び経済性（石炭の価格は LNG の約半分以下）による。図 1.1.3 は電源別のライフサイクル二酸化炭素排出量の比較を示している。化石燃料を使用する石炭火力、石油火力、LNG 火力からの二酸化炭素排出量が、原子力発電、水力発電、風力発電、太陽光発電に比べて 10 倍以上になっており、火力発電所におけるエネルギーの有効利用・熱効率向上が二酸化炭素排出量削減に不可欠であることがわかる。

わが国における火力発電所の熱効率は年々上昇しており、1951 年の 9 電力 発足当時の約 19%（9 電力平均）から現在は約 41%（10 電力平均）となっている。以下に、石炭火力発電、LNG 火力発電及び原子力発電における熱効率向上への取り組みについての調査結果を報告し、最後に、ADS の利用による効率向上の可能性について述べる。

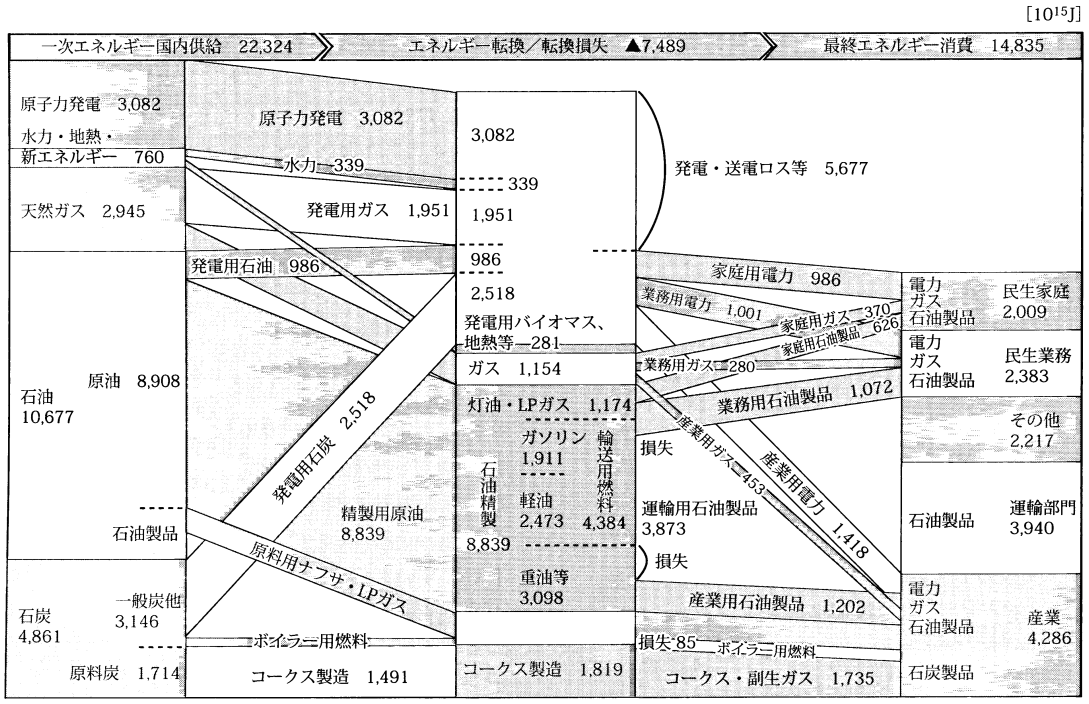
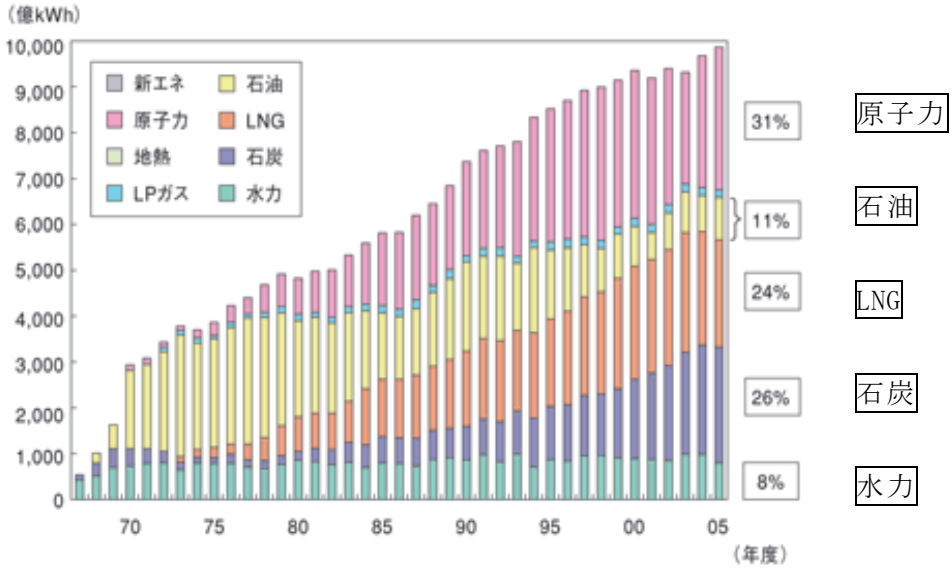


図 1.1.1　日本のエネルギーバランスフロー[1]



資料：資源エネルギー庁「電源開発の概要」等
(注) 71年度までは9電力会社計

図 1.1.2　わが国の発電電力量の推移[1]

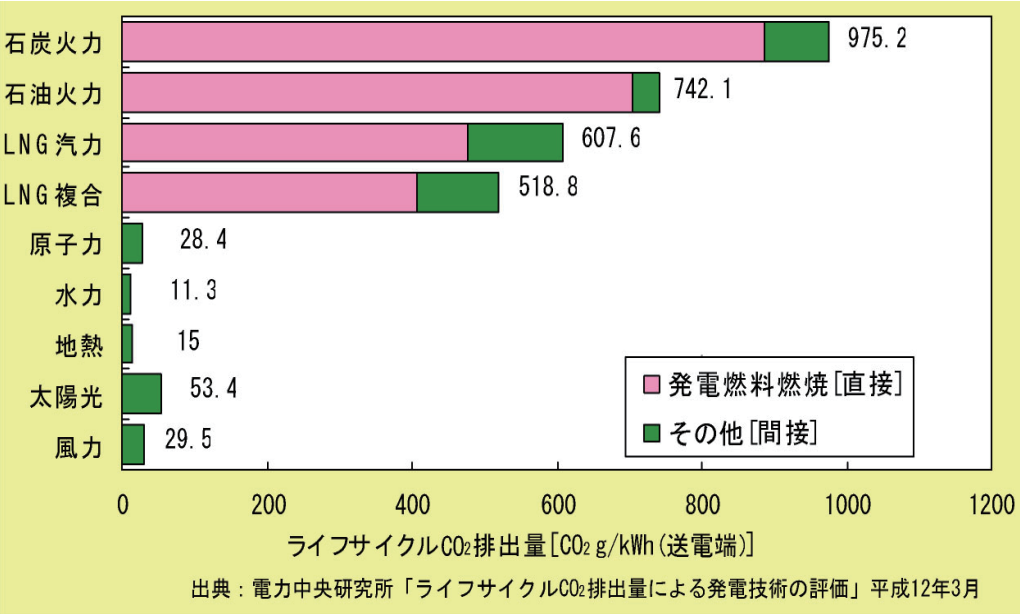


図 1.1.3　電源別二酸化炭素排出量

１．１．１　石炭火力における課題と必要性

経済産業省が 2008 年 3 月にまとめた高効率石炭火力発電のロードマップの概要を図 1.1.4 に示す。高効率化に向けて、蒸気条件の高温、高圧化を進める方向と、石炭をガス化し、ガスタービンと蒸気タービンとを使って発電する複合発電を進める方向で開発が進められている。

石炭を燃料とする火力発電はボイラで石炭を燃焼するシステムが主流であり、これまで蒸気条件を亜臨界（主蒸気・再熱蒸気温度 538℃/566℃、送電端効率（注 1）40%）から超臨界、超々臨界（Ultra-super Critical 600℃、25MPa、42%）と高温、高圧化して効率を改善してきた（図 1.1.5 参照）。更に効率を高めるために、主蒸気条件を 700℃、35 MPa に高める先進超々臨界システム（Advanced-Ultra-super Critical 送電端効率目標 46%）に向けた開発が行われている。図 1.1.6 は蒸気条件とプラント効率の関係を示す。図 1.1.7 に先進超々臨界システムの基本構成と開発課題を示す。開発に際しては、ボイラ、蒸気弁、蒸気タービンなどの高温材料の開発が大きな課題となっている[2]～[5]。

注 1

発電所の場合、熱効率は燃料の保有発熱量（kcal）が発生電力量（kW）に変換された割合を指す。発電所の熱効率には、発電端熱効率と送電端熱効率がある。発電端熱効率は、タービンに繋がれた発電機が発電したそのままの電力量を用いて算出する。送電端熱効率は、発電端電力量から発電所内で使った電力量を差し引いた正味電力量（net power）を用いて算出する。

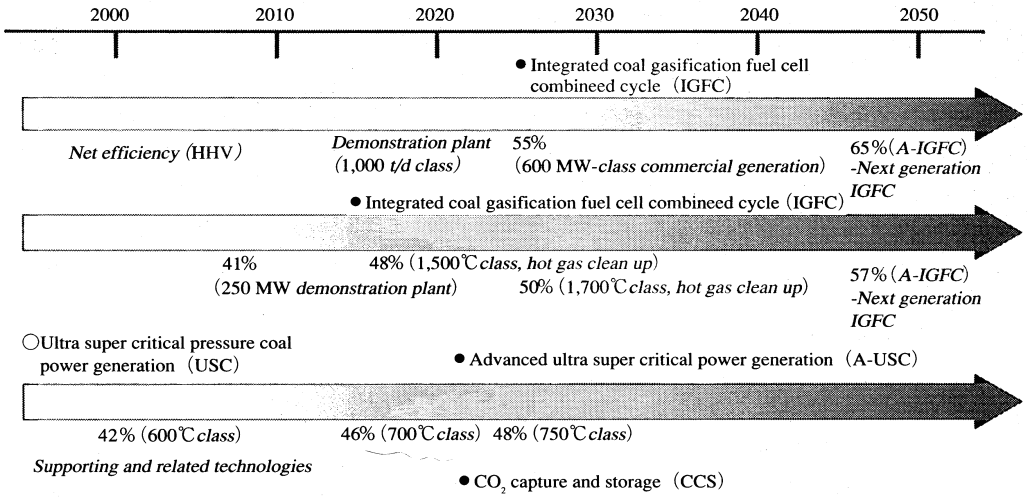


図 1.1.4　高効率石炭火力発電のロードマップ[3]

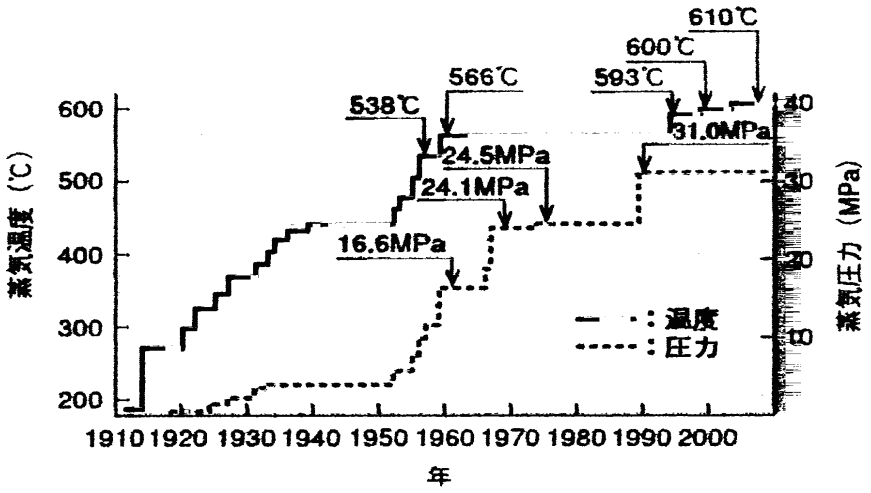


図 1.1.5　火力発電プラントの蒸気条件の変遷[4]

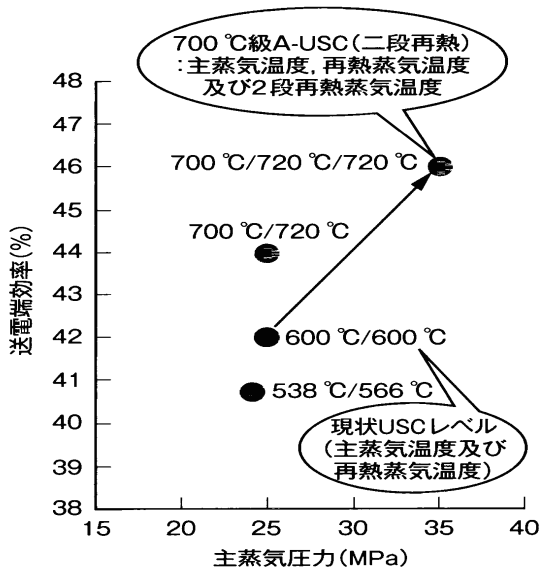


図 1.1.6　蒸気条件とプラント効率[5]

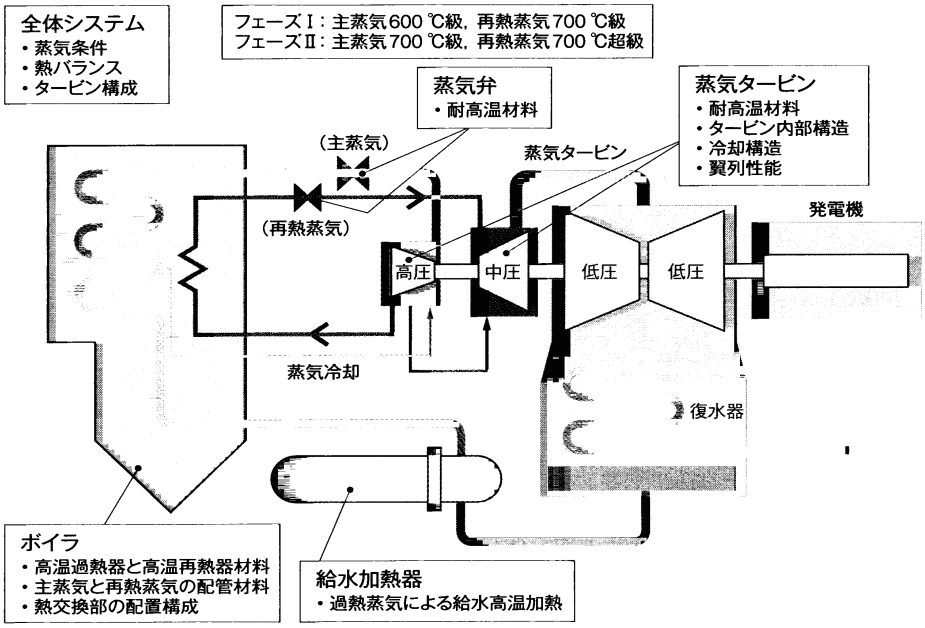


図 1.1.7　先進超々臨界システムの基本構成と技術課題[5]

また、石炭をガス化し、ガスタービンと蒸気タービンの複合発電(Integrated coal Gasification Combined Cycle)を行うことにより、効率を向上させる方法も開発されている（図 1.1.8 参照)。石炭ガス化設備において石炭を CO 及び H_2 を主成分とする石炭ガスに転換し、ガス精製設備で不純物を除去した後、ガスタービン用燃料として供給し、複合発電を行う。この方法では、石炭をガス化するためにエネルギーを消費するが、複合サイクルの高効率を生かすことができる。これまでに、実証機において送電端効率 42%が得られており、1500℃級ガスタービンを導入することにより商用段階では送電端効率 48%と見込まれている[6]、[7]。

図 1.1.4 にも示したように、石炭をガス化することにより、ガスタービン、蒸気タービンに加えて燃料電池を組み合わせてトリプル複合発電を行う石炭ガス化燃料電池複合発電技術の開発が進められている。実現すれば 55%以上の送電端効率が可能となり、二酸化炭素排出量も既存の石炭火力に比べて約 30%低減化が見込まれるが、安価で高効率の燃料電池の開発など乗り越えるべき課題は多い。

石炭火力発電所においても蒸気タービンにより発電機を稼働し発電が行われている。ここでも、蒸気量の制御に油圧駆動が使われているが発電した電気の一部が使われているため若干の発電効率低下がある。したがって、蒸気の一部を小型蒸気タービンに供給し、直接 ADS モータを駆動する方法により ADS の適用が可能である。

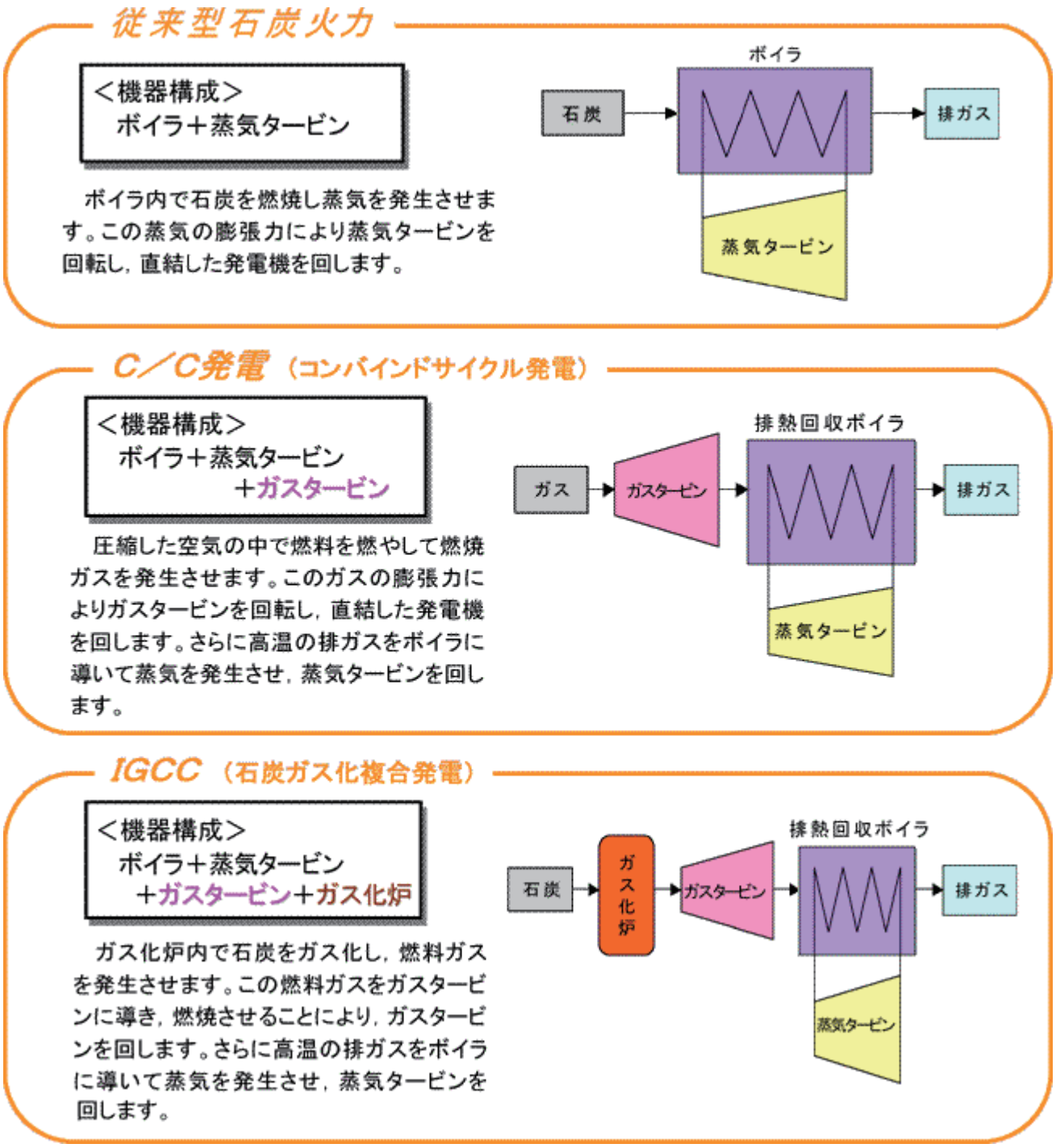


図 1.1.8　石炭火力発電（クリーンコールパワー研究所ホームページより）
http://www.ccpower.co.jp/igcctoha/igcctoha.html

１．１．２　LNG 火力における課題と必要性

天然ガスは石炭に比べて二酸化炭素排出量の少ない燃料であるが、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた複合発電によって一層の効率向上が図られている。1984 年にわが国で初めて導入された東北電力㈱東新潟火力発電所の複合発電システムでは、タービン入口温度 1100℃級の D 形ガスタービンを採用し、48%の発電端効率を達成した。その後、タービン入口温度の上昇とともに、1300℃級の F 形ガスタービンを経て、2007 年に運転

を始めた最新の 1500℃級の G 形ガスタービンを使った東京電力㈱川崎火力発電所では発電端効率 59%、送電端効率 53%となっている。これら複合型発電の効率と従来型火力発電の効率推移を図 1.1.9 に、タービン入口温度と発電効率の関係を図 1.1.10 に示す。また、この効率向上に伴う kWh 当たりの二酸化炭素排出量削減効果を図 1.1.11 に示す。1950 年以降排出量は減少を続けているが、従来型火力発電では効率向上の鈍化に伴い、排出量の削減もあまり進まなくなっている。一方、複合発電では熱効率の向上に伴い、二酸化炭素排出量の削減も進んでおり、更にタービン入口温度を高めることにより効率が向上し、二酸化炭素排出量が削減されることが期待できる。現在、発電端効率 62～65%を目標とするタービン入口温度 1700℃級のガスタービンの開発が進められている[5]、[7]～[10]。

全世界における総発電量は、2000 年に 15×10^{15}Wh であり、2010 年には 20×10^{15}Wh、2030 年には 30×10^{15}Wh を超えると予想されている。LNG による発電量は 2010 年には 5×10^{15}Wh、2030 年には 10×10^{15}Wh と予想されているが、2030 年の LNG 発電をすべて G 形または 1700℃級のガスタービンを使った複合発電にしたとすると、二酸化炭素の排出量は従来の F 形に比べて G 形で 2 億トン、1700℃級で 5～7 億トンの削減になる（図 1.1.12 参照）。

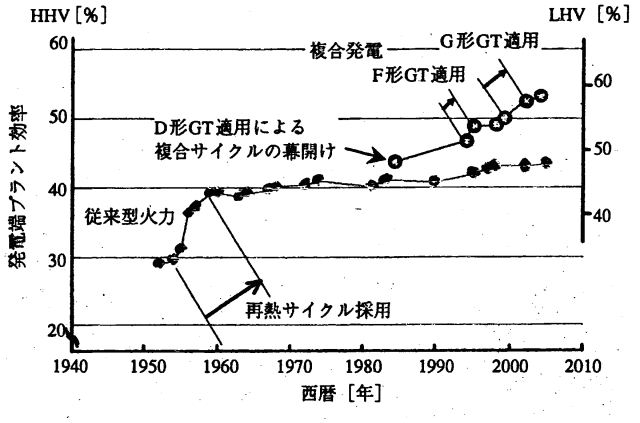


図 1.1.9　複合発電における熱効率の推移[8]

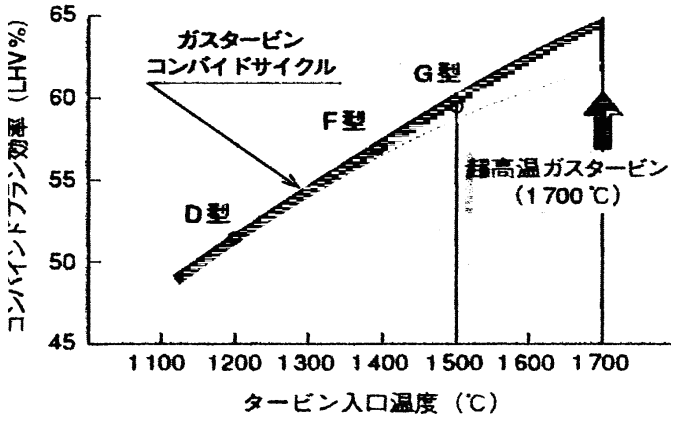


図 1.1.10　タービン入口温度とプラント効率[9]

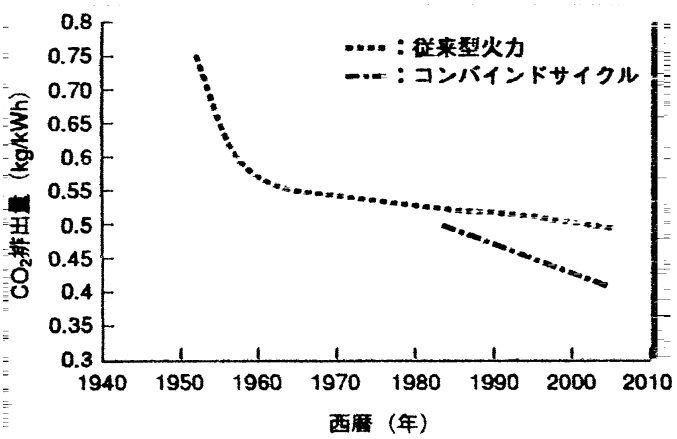


図 1.1.11　二酸化炭素排出量の推移[9]

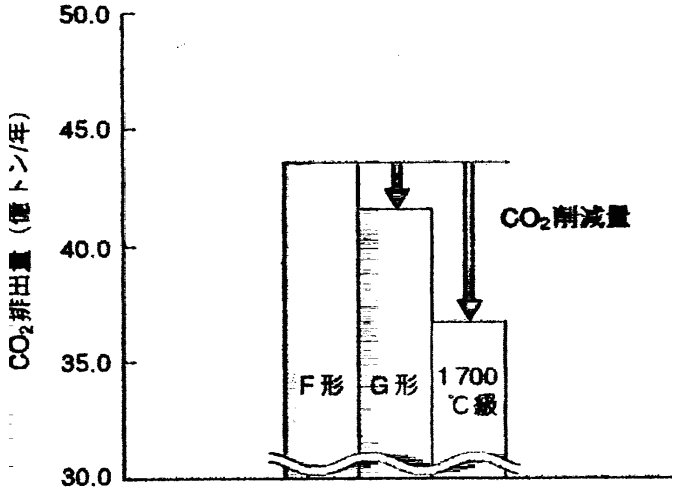


図 1.1.12　LNG 複合発電による CO2 排出量予測[9]
（10000TWh 当たりの排出量を示す）

2008 年 12 月 19 日に東京電力㈱川崎火力発電所の見学調査を行った。同発電所には最新鋭の次世代高効率複合発電システム（More Advanced Combined Cycle 1500℃級コンバインドサイクル）が導入されており、説明を受けた。東京電力㈱から配布された資料より、図 1.1.13 に設備の構成、表 1.1.1 にその仕様、図 1.1.14 にエネルギーフローを示す[11]。このシステムは、1500℃の燃焼ガスを供給し、ガスタービンで仕事をした後 610℃程度まで温度の下がった排ガスを廃熱回収ボイラに導き、蒸気を発生させ蒸気タービンを駆動する。ガスタービンの出力は 33 万ｋW であり、蒸気タービンは高圧蒸気（13MPa、560℃）、高温再熱蒸気（3MPa、570℃）、低圧蒸気（0.4MPa、270℃）でそれぞれのタービン羽根車を駆動するもので、出力 17 万 kW である。図 1.1.14 のエネルギーフローによれば、外部に廃棄される損失エネルギーは、排ガス中の 8%と冷却水中の 33%の熱エネルギーだけである。冷却水の水温上昇は 7 ℃以下であることから再利用は難しいこと、また、排ガスの温度は 90℃程度であるが、これを更に利用して温度を下げると排ガスが大気中に十分拡散せず、大気汚染の原因となるといわれていることがわかった。

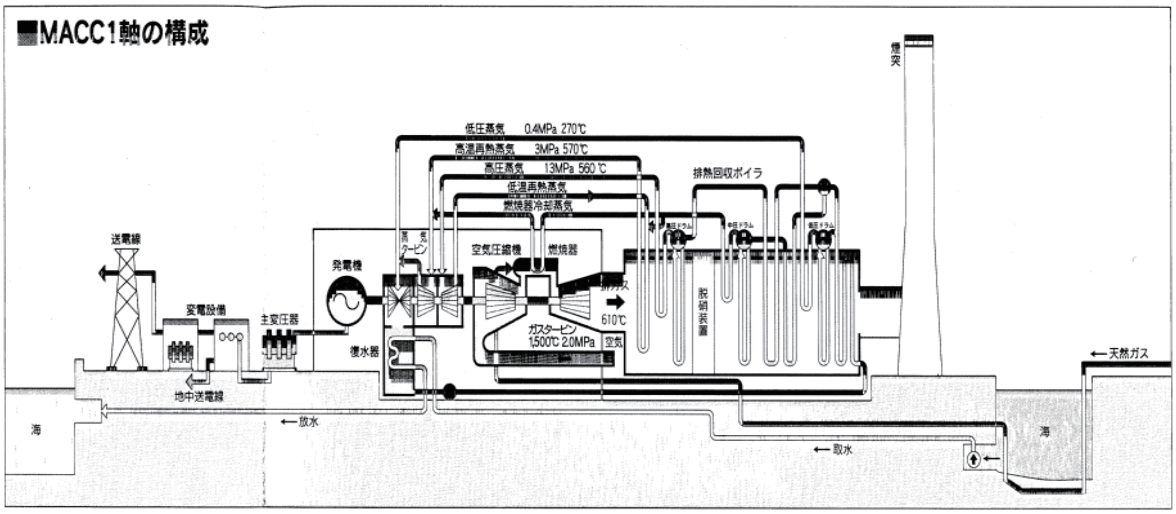


図 1.1.13　東京電力川崎火力発電所複合発電設備の構成[11]

表 1.1.1　東京電力川崎火力発電所複合発電設備の仕様[11]

MACC発電プラントの仕様

【主要機器性能（1軸当り）】

●ガスタービン
型　　式：開放サイクル一軸型
出　　力：約33万kW(気温5℃)
入口ガス温度：約1,500℃
圧 力 比：約21
燃 焼 器：予混合燃焼式
使用燃料：LNG気化ガス

●蒸気タービン
型　　式：三圧力再熱複流排気復水型
出　　力：約17万kW(気温5℃)
蒸気圧力：高圧…約13MPa
　　中圧…約3MPa
　　低圧…約0.4MPa
蒸気温度：高圧…約560℃
　　中圧…約570℃
　　低圧…約270℃

●排熱回収ボイラ
型　　式：排熱回収自然循環型(三圧力再熱式)
蒸 発 量：約530トン/h

●排煙脱硝装置
方　　式：乾式アンモニア接触還元方式
　　(排熱回収ボイラに組込み)
脱硝効率：90%

●発電機
型　　式：横軸円筒回転界磁型
　　三相交流同期発電機
定　　格：約558,000kVA
電　　圧：約16,200V

●起動装置
サイリスタ起動方式

【環境諸元（1系列当り）】

●窒素酸化物（煙突出口）
低減対策：予混合型低NOx燃焼器
　　高性能脱硝装置
排出濃度：定格時……5ppm
(16%O₂換算)　運用最大…8.5ppm
排 出 量：48m³N/h

●温排水
冷却水使用量：34m³/s
取放水温度差：7℃以下

蒸気タービンを用いる発電所は、出力 100 万 kW 以上にもなる大型の蒸気タービンを利用して発電機を回し、電力を生成する。交流電力の発電機は、50 Hz のシステムの場合には 3000 rpm、60 Hz のシステムの場合には 3600 rpm など、発電システムの周波数に対応した一定の同期回転数で回転しなければならない。したがって、交流電力の発電には、負荷変動（電力需要）によらない正確な速度制御が必要である。現在、多くの蒸気タービンを用いる発電所では、タービン内に供給される蒸気の流れを油圧駆動の蒸気制御弁によって制御し、発電機の回転数を一定に保っている。図 1.1.15 は蒸気弁作動システムの簡略図である。

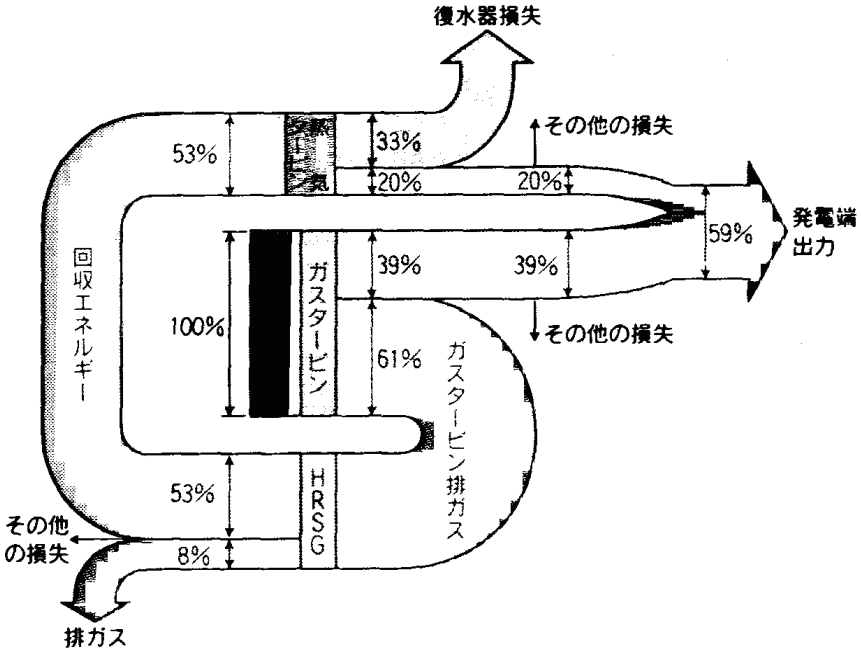


図 1.1.14　複合発電におけるエネルギーフロー[11]

一方、発電所における油の漏洩は消防法によって厳しく管理されており、油圧駆動システムからの僅かな油の漏洩であってもプラントを止めるという重大事態に至る。蒸気タービンの制御に油圧駆動システムを用いることにより非常にリスクが高いシステムになっていることになる。この油圧駆動システムを新・水圧駆動システム ADS に置き換えて環境対応化すれば、このようなリスクは解消される。すなわち、蒸気タービンを用いる発電所における ADS の利用は大きな利点を有しているといえる。

同じウラン濃縮度の条件で長サイクル運転を実施すると取替燃料体数が増加するため燃料の燃焼効率が低下する。そのため、ウラン濃縮度を高くして、取出し時の燃焼度を高くする高燃焼度化が進められている。燃焼の高燃焼度化により 1 体あたりに発生するエネルギー量が増加すれば、取替燃料体数が減るため燃料の燃焼効率が良くなり、燃料経済性向上につながる[12]。

また、わが国の原子力プラントでは、13 ヶ月毎にプラントを停止して定期検査を行っているが、停止までの期間を延長してプラントの稼働率を向上させる長サイクル運転の検討が進められている。長サイクル運転を実現するためにはプラントの安全性・信頼性を確保することが前提となる。そのためには、プラントを構成する設備・機器の信頼性を過去の保全実績や最新の知見に基づいて評価するとともに、必要に応じて保全内容や点検間隔を見直すことによって保全の最適化を図る必要がある[12]。図 1.1.16 は加圧水型原子炉の計画外停止率の日米比較であり、わが国の保全の信頼性を示している[13]。

特殊環境条件下であることから、点検・保全作業はマニュアル遠隔操作によって行われている。期間短縮のために特殊環境条件下でも使用できる ADS 多自由度マニピュレータ

の開発が望まれる。

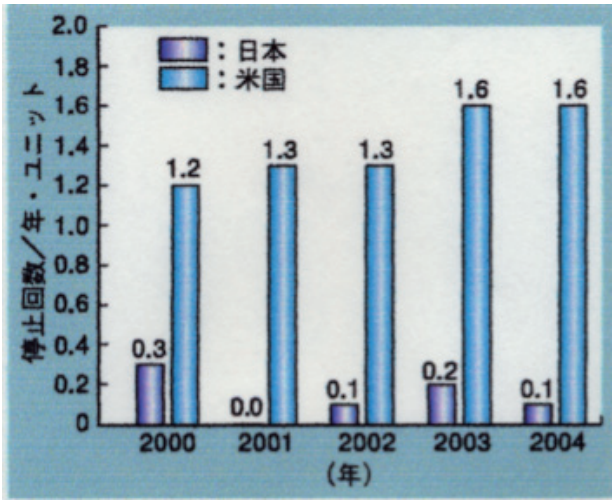


図 1.1.16　加圧水型原子炉の計画外停止率[13]
（日米の比較：左　日本、右　米国）
（出典：原子力施設運転管理年報、（独）原子力安全機構）

１．１．４　ADS 導入に向けての可能性

上述のように、最先端の火力発電所では、損失エネルギーは排ガス中の 8%と冷却水中の 33%の熱エネルギーだけである。冷却水の水温上昇は 7℃以下であり、再利用は難しい。

また、排ガスの温度は 90℃程度であるが、これを更に利用して温度を下げると排ガスが大気中に十分拡散せず、大気汚染の原因となるといわれている。

しかしながら、制御弁の操作に油圧が用いられているが、安全上の理由から難燃性作動油が用いられており、作動油の管理等を考えると ADS の導入の検討は十分な価値がある。現状では、ポンプの駆動には発電した電力を用いているが、上述の廃棄しているエネルギーを利用してポンプを駆動することができればエネルギー効率の向上につながる。

具体的には、

(1)3MPa の高温再熱蒸気の一部を利用してタービンを駆動し、直接ポンプを駆動する方法

(2)カリーナサイクル(注 2)を用いて低温度の流体（煙突から排出される 90℃程度の排ガスや吸入時よりも 7℃温度上昇している冷却排水）の持つ熱エネルギーを利用して発電する方法

(3)高温再熱蒸気の一部を利用してフリーピストンポンプ(注 3)を駆動し、ADS の水圧源とする方法が考えられる。

従来の方法では、

高温再熱蒸気（13MPa、570℃）のもつエネルギー
↓　蒸気タービン
機械的仕事（軸の回転）
↓　発電機
電気エネルギー
↓　電動機
機械的仕事（軸の回転）
↓ ポンプ
流体エネルギー（高圧の水）

と、4 回のエネルギー変換を行っている。これに対して、方法(1)では、

高温再熱蒸気（13MP a 、570℃）のもつエネルギー
↓　蒸気タービン
機械的仕事（軸の回転）
↓ ポンプ
流体エネルギー（高圧の水）

と、エネルギー変換の回数は 2 回であり、方法(3)では

高温再熱蒸気（13MP a 、570℃）のもつエネルギー
↓ フリーピストンポンプ
流体エネルギー（高圧の水）

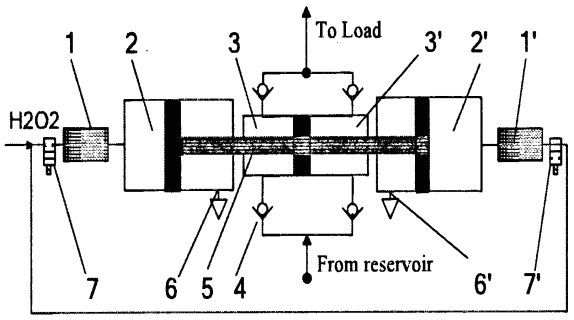
と、1 回のエネルギー変換で高圧の液体を得ることができる。なお、方法(2)では、方法(1)に場合の高温再熱蒸気の持つエネルギーの代わりに煙突から排出される 90℃程度の排ガスのもつ熱エネルギーを用い、蒸気タービンの代わりにカリーナサイクルタービンを用いるので、方法(1)と同様にエネルギー変換の回数は 2 回である。

方法(1)と(3)は、発電に利用している高温再熱蒸気を利用するため、発電効率を低下させることになるが、ポンプの駆動に使用する動力は発電量に比べればわずかであり、大きな影響はない。川崎火力発電所では、高温再熱蒸気（13MPa、570℃）の一部を地域への熱供給に当ててコージェネレーションを行っているが、それでも発電効率にはほとんど影響していない。方法(2)では従来のタービン－発電機－電動機－ポンプというエネルギー変換に比べ、エネルギー変換の回数が少ない分だけ損失が少なくなる。方法(3)ではタービンを使わずに蒸気で直接ポンプを駆動するため更に損失が少なくなることが期待される。

注２　カリーナサイクル：水よりも沸点の低いアンモニア水を媒体として使用する熱交換システムであり、比較的低温の一次媒体のもつ熱エネルギーを効率用利用できることから、海洋温度差発電や温泉などの熱回収発電への利用が検討されている。海洋温度差発電への応用については佐賀大学[14]で、温泉熱回収発電については長野県小谷村で温泉の源泉のもつ熱エネルギーを利用して発電を行うための実証試験が行われている[15]ほか、草津温

泉でも検討されている。

注３　フリーピストンポンプ：従来、クランクと回転軸がなく、燃焼ガスによるピストンの往復運動だけを利用するフリーピストンエンジンが研究されてきたが、近年内燃機関ではなく、燃焼ガス以外の高圧ガスを利用して高圧の油を発生させるフリーピストンポンプに関する研究が各国で行われている[16]～[18]。図 1.1.17 は、可搬型のパワーアシスト装置の動力源として使用することを目的に開発された、過酸化水素を利用したフリーピストンポンプの原理図を示す。図中の 2/2´のガスシリンダに交互に高圧の蒸気を供給することにより、3/3´の液圧シリンダ内の液体が交互に圧縮され、高圧液が排出される。上述のエネルギー効率向上策(3)では、図 1.1.16 中の gas cylinder 2 及び 2' に交互に高圧蒸気を供給することにより、hydraulic cylinder 3 及び 3' から交互に高圧の水を排出することができ、ADS の水圧源として機能する。



1/1' catalyst bed
2/2' gas cylinder
3/3' hydraulic cylinder
4　check valve
5　free piston axis
6/6' exhaust ports
7/7' fuel valve

図 1.1.17　フリーピストンポンプ[18]

参考文献

[1]　経済産業省編：エネルギー白書 2007 年版、(2007) 318

[2]　沖田、高橋、佐藤：高効率蒸気タービン及び発電機、東芝レビュー、63 - 9 (2008)、１２/１６

[3]　斎藤英治：700℃級先進的超々臨界圧を実現する蒸気タービン開発の進展、ターボ機械、36 - 11 (2008)、658／664

[4]　橋本、田中、外野、平崎：石炭焚き発電技術の高効率化の現状と展望、三菱重工技報、45 - 1 (2008)、9／11

[5]　宮池潔：電力エネルギー供給の将来動向と次世代火力発電技術、東芝レビュー、63 - 9 (2008)、２/７

[6]　原三郎：IGCC システム実用化の進展と課題、ターボ機械、36 - 11 (2008)、672／677

[7]　一ノ瀬、菱田、伊藤：火力プラントの高効率化への取組み、三菱重工技報、45 - 1(2008)、6／8

[8]　伊藤、塚越：次世代コンバインドサイクルシステム実用化の進展と課題、ターボ機械、36 - 11 (2008)、678／686

[9]　石川、寺内、小森、安良岡：ガスタービンコンバインドサイクルプラントの高効率化

への取組み、三菱重工技報、45‐1（2008)、12／14
[10] 風尾幸彦：次世代超々臨界圧蒸気タービンシステム、日本機械学会誌、111－1079（2008)、849/851
[11] 東京電力(株)パンフレット、MACC1500℃級コンバインドサイクル発電
[12] 宮口、関：原子力発電プラントの有効活用に向けた取組み、三菱重工技報、45‐1（2008)、41／43
[13] 山内、岡田：世界的な原子力リーディング総合カンパニーとしての技術開発の現状と今後の取組み、三菱重工技報、43‐4（2006)、2／9
[14] 上原、池上、福川、宇都：カリーナサイクルを用いた海洋温度差発電システムの性能解析(サイクルの熱力学的特性)、日本機械学会論文集（B 編)、60－578（1994)、3519/3525
[15] 佐藤、岡部、中田、池上、新妻：地域コミュニティにおける地熱資源の利用　～小谷村地域～、日本地熱学会平成 20 年学術講演会講演要旨集、(2008)
[16] 日比昭:油圧式フリーピストンエンジン--エンジンと油圧ポンプを一体化させた新しいタイプの原動機、油空圧技術、45－9（2006)、21／24
[17] Riofrio.R、Barth.E.：Experimental Assessment of a Free Elastic-Piston Engine Compressor with Separated Combustion Chamber, Poc. of Fluid Power and Motion Control 2008, (2008), 233/244
[18] Ren,H., Xie.H. and Yamg H.：Design and Optimization of a Novel Hydraulic Free Piston Engine with Liquid –propellant-power, Poc. of Fluid Power and Motion Control 2008, (2008), 340/353

１．２　新・水圧技術（ＡＤＳ）の環境対応エネルギーシステムへの応用

本節では、現在わが国ならびに海外において研究開発が進められている様々な環境対応エネルギーシステムに対する新・水圧技術（ADS）の応用の可能性について、いくつかの事例をもとに明らかにする。

１．２．１　水力発電

（１）ダムゲート

水力発電所のダムゲートの駆動には油圧が使われている。たとえば、関西電力大滝水力発電所の大滝ダムは日本で初めて油圧駆動のクレストゲートが導入された。大滝ダムは、景観設計の観点から、ダム天端からの構造物の突起をできるだけ抑えるように設計された。クレストゲート関連の設計も堤体内のスペースに納めるために、コンパクトな油圧駆動が採用された。

しかし、油圧駆動システムにおいては可燃性流体を扱う関係上「消防法」の厳密な適用を受けなければならないため管理上難しい点がある。ADS 駆動を使えば、使用する駆動媒体が“水”であるため、「消防法」の適用を受けることなく、万が一の漏液の場合でも環境汚染の心配がない。図 1.2.1 は水圧駆動の水門である。この技術にも見られるように、高出力高応答な新・水圧駆動システムは高度な制御を必要とするダムゲートにおいても十分応用できると考えられる。

図 1.2.1 水圧駆動の各種水門（栗本鐵工所のホームページより）

（２）ガイドベーン

水力発電所では水車の出力・回転数制御をガイドベーンで行っているが、従来、その駆動制御は比較的低圧で大型の油圧駆動システムで行われている。このシステムでは比較的多くの油が使用されているが、万一これが漏れると環境汚染のもととなる。

このような環境汚染を防止するため､ダンフォス社は図 1.2.2 と図 1.2.3 に示すようなガイドベーン制御用水圧駆動システムを開発している。このシステムの水圧源は電動モータ駆動であるが、スウェーデンではこのような水圧駆動システムが十数か所ですでに使用されており、その環境親和性が周知されれば、わが国でも普及する可能性大である。

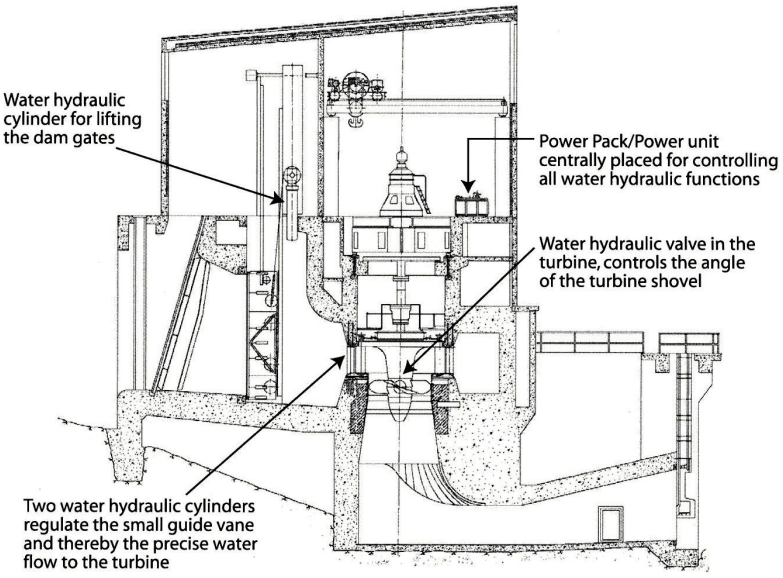


図 1.2.2　水力発電所のガイドベーン制御（ダンフォス社のパンフレット）

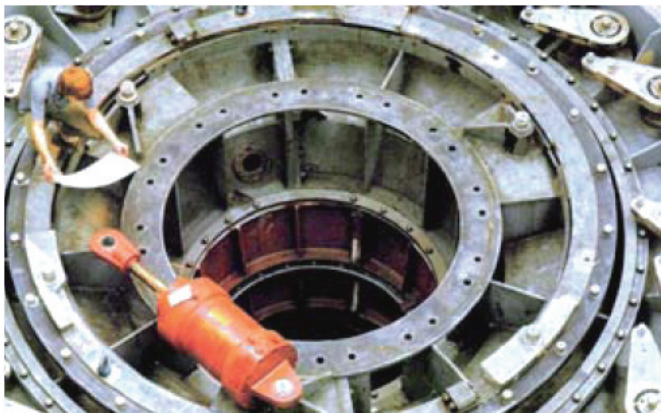


図 1.2.3　水力発電所のガイドベーン写真（ダンフォス社のパンフレット）

１．２．２　風力発電

風力発電には風速と風向きに適応した羽根の角度制御が必要である。つまり、風速の変化に関係なく、出力を一定に保持できるように羽根の角度の制御が必要である。風速が下限風速を上回ると、風車は自動回転を始め定格回転数になると発電を開始する。風速が上限風速を超えると、羽根の角度を変え、風を逃した状態で停止して待機する。また、風車は風を効率よく利用するため風向きの変化に即応してその方向を変える必要もある。このため、風車を回転させ、風車の方向を風向きに合わせる。図 1.2.4 は風力発電装置概要図である。羽根の角度制御は油圧駆動システムによって実現されている。風車には落雷の可能性が大きく、油圧駆動の場合は落雷によって火災が発生する恐れがあり、ADS 導入は有効な選択肢となる。

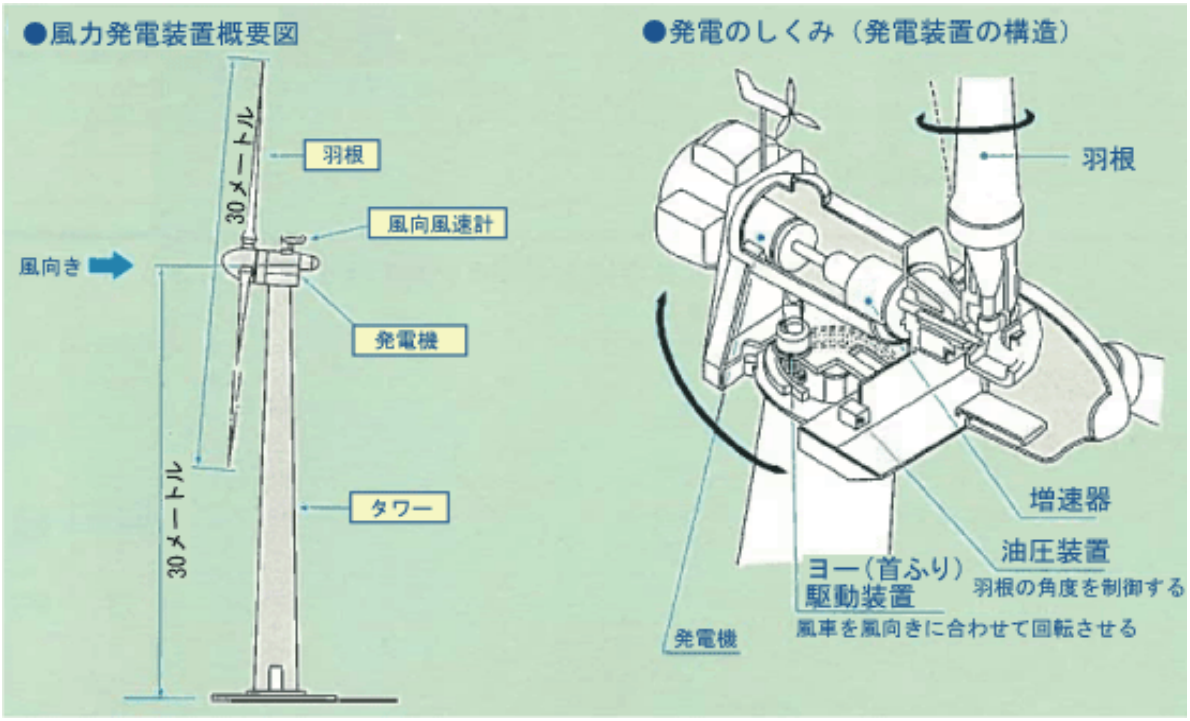


図 1.2.4　風力発電装置（九州電力㈱甑島風力発電所のホームページより）

更に近年は風力発電を海上に移す傾向が高まっている。主な理由は陸上では、風力タービン設置に適した土地が不足していることや海上では陸上よりも平均風速がかなり速いということが挙げられる。海岸からある程度離れた海上では、風速が陸上より 20%程度も上昇することがよくある。風力エネルギーは風速の 3 乗に比例するため、海上での発電量は陸上と比べて計算上約 73%増えることになる。海上風力発電が有利なもう一つの点として、水面が大体において平坦なことがあげられる。つまり、海上においては、風力タービンは背の低いタワー（従って低コスト）で済むことになり、経済性もすぐれたものとなる。

デンマーク政府のエネルギー計画“Energy 21 ”によれば、2030 年までに 400 万 kW の海上風力タービンが設置される。その時点でデンマークは、全電力消費量の 50%以上を風力エネルギーで供給することになる。400 万 kW の海上風力発電プラントを建設するための投資の総額は約 480 億 DKK で、風力発電に関してはこれまでで世界最大の投資になる。

風力発電を陸上から海上に移すことになると、羽根の角度制御に用いる油圧駆動の油漏れによる海の汚染問題が深刻化することは必至である。そのため、これを ADS 駆動とすることは有力な選択肢と考えられる。しかし、海上でのメンテナンスはリスクが多く、ADS 化は現在のところ進んでいない。

１．２．３　太陽光発電

現在、世界最大と言われる太陽光発電所はスペインのもので総出力は 2.3 万 kW である。今後建設予定のものでは、ドイツに 4 万 kW、オーストリアに 15.4 万 kW の発電所の計画が控えている。特に、米国の PG&E 社は 80 万 kW の太陽光発電契約を結んだと発表している。2010 年から一部で発電を開始し、2012～2013 年に完成を目指す。世界でも類を見ないこの大規模発電所のおかげで、全米の太陽光発電の設置数は一気に 2 倍に膨れあがることになる。

一方、シャープと関西電力は、大阪府堺市の臨海部において、大型の太陽光発電所と発電施設（図 1.2.5 参照）を共同で建設することを発表した。2009 年に着工し、2011 年に運転を開始する予定である。

図 1.2.5　太陽光発電所の最終完成予想図（関西電力㈱のホームページより）。

太陽光発電のパネルの汚れは受光障害をもたらし、発電効率を低下させることがある。特に図 1.2.5 に示すように、地上設置の場合、屋根の上に設置される場合と異なり、汚れは風雨によって自然に洗い流されにくいため、機械による洗浄の必要がある。洗浄機械の駆動としてはパネルの雨水を集めて利用する ADS 駆動が有望な選択肢と考えられる。

発電効率を向上させるため、米ボッシュ・レックスロス㈱は大規模な太陽発電の発電基地で太陽を追尾するパネル駆動用油圧機器を開発した。現時点はコストの面でやむを得ず油圧駆動を選んだと推察できる。将来、環境問題が顕在化した場合、ADS パネル駆動システムも考えられる。

１．２．４　波力発電

日本の港湾空港技術研究所の試算では、日本に押し寄せる波をすべて発電に利用できたとすると、3500 万 kW となり、日本の総発電量の約 1/3 をまかなうことができる。波のエネルギーを全て利用することは難しいが、非常に多くの未利用自然エネルギーがあることは確かである。

近年、欧米では勢力的に海洋波力発電の開発・研究を行っている。例えば EU は 2020 年までに全発電量のうちの 20%を自然のエネルギーを利用した発電に切り替えることを目標とし、アメリカ・カリフォルニア州では 33%を目標としている。そのため、風力、太陽光に続いて、海洋波力が注目を集めている。図 1.2.6 と図 1.2.7 は Google が出願した波力発電装置である。波力エネルギーは油圧シリンダを用いて回収し発電する。

図 1.2.6　海洋波力発電装置（Google 社の出願特許より）

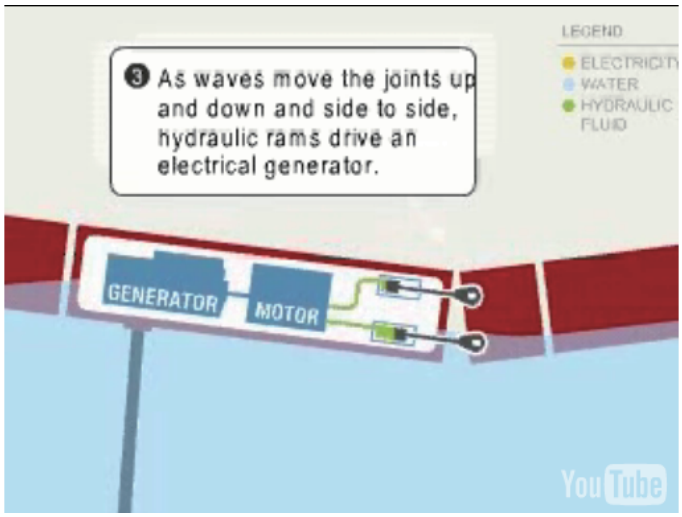


図 1.2.7　波力発電方法（Google 社の出願特許より）

従来の海洋波力発電の多くは空気圧あるいは油圧駆動を利用しているが、空気圧駆動では空気圧のエネルギー密度が低いこと、一方、高エネルギー密度の油圧駆動では油の漏れが環境を汚染することなどの問題点がある。したがって海に設置される装置は ADS 駆動

が適していると考える。

１．２．５　まとめ

いくつかの事例をもとに、現在進められている環境対応エネルギーシステムへの新・水圧技術の応用の可能性を明らかにした。このような新・水圧技術の応用の利点を更に明確にするためには ADS を用いたロボティクス技術の確立が必要であり、確立されればその応用は確実である。

１．３　新・水圧技術（ADS）を利用した二次側エネルギー消費システムへの展望

図 1.3.1 に ADS の応用分野を樹木形式で表してみた。図中左下の枝部に一次側エネルギー分野への応用を示している。これについては前節でその ADS の応用の可能性について説明した。ここでは主に二次側エネルギー消費システムへの応用について述べる。「環境と省エネルギー」は、今や産業から民生に至るあらゆる分野で要求される社会的キーワードである。そのような視点に立って、エネルギー消費分野を樹木の中心に据えて表現している。

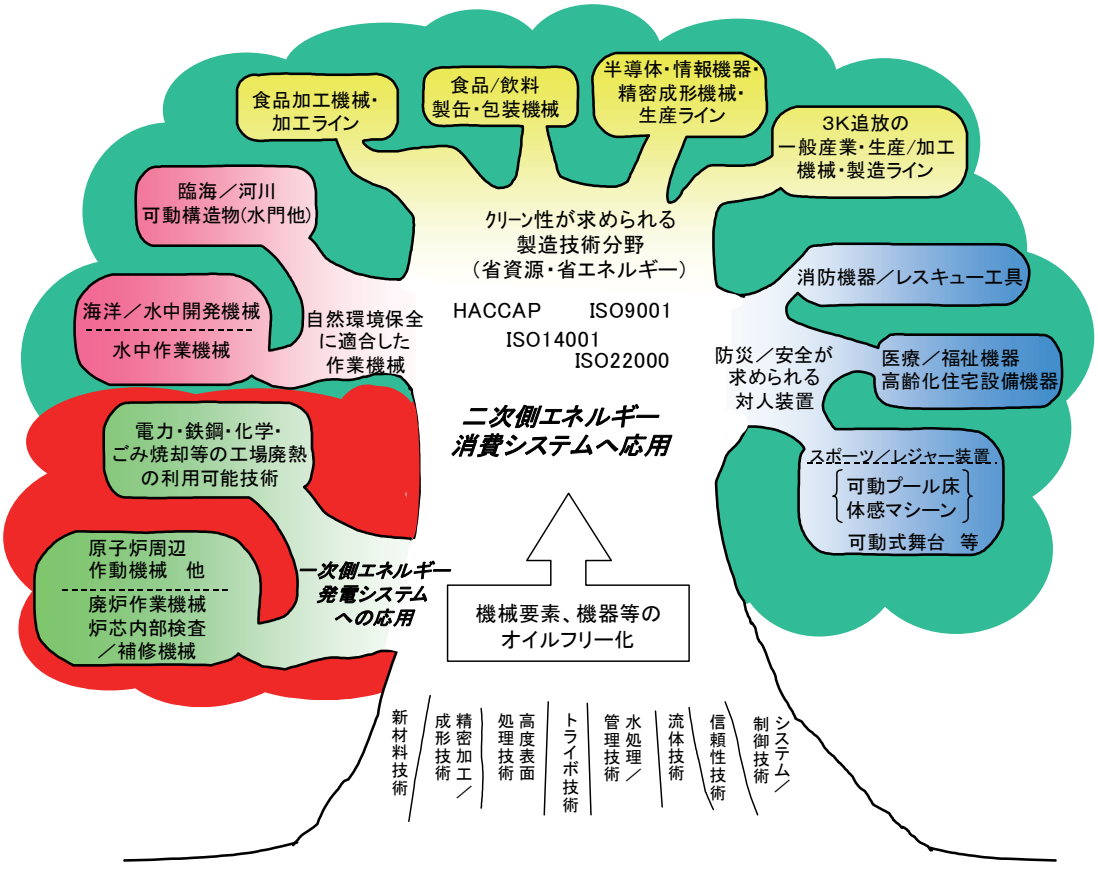


図 1.3.1　新・水圧技術（ADS）応用分野の全体像とそれを支える基盤技術

環境といっても多くの内容、意味、定義、など多くの性格をもっている。図 1.3.2 は、現在、世の中の要求として挙げられる「環境の多面性」を示している。環境の多面性を配

慮して説明する。かつて多くの環境汚染をもたらした、大気汚染、空気汚染、土壌汚染、水質汚濁などから端を発した環境意識は、今やあらゆる分野に浸透させねばならない状況に来ている。近年低炭素社会の構築から省資源、省エネルギーは環境の多面性の大前提とされる。ADS の応用においては「省資源」ADS の作動流体としてリサイクルを含めて、「水」の有効利用が時代の要求に答える技術である。また、多くのリスクを抱える化石燃料使用の極小化に貢献し得る。「省エネルギー」においては ADS 自身の駆動運転効率の向上はもとより、他のエネルギー発生システムとのコージェネレーションでの可能性を包含している。加えるに ADS から発生する流体損失による排熱をヒートポンプと組み合わせ、工場や生産ラインの洗浄湯として利用が可能であるなどはその一つでもある。以下にこの環境の多面性の中で現在 ADS が一部実用化されている分野及び将来 ADS の応用が有望視（望まれる）される分野、一部実用されているものも含めてまとめて下記に示す。

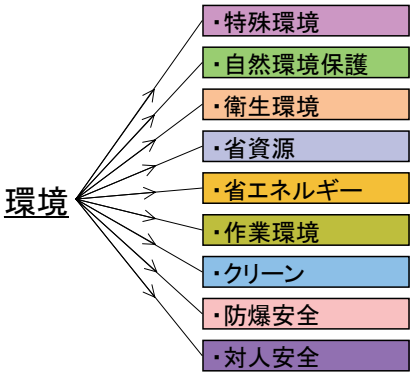


図 1.3.2　環境の多面性

①清浄、衛生、クリーン環境分野

清浄、衛生、クリーン環境が要求される分野には、主に下記のような業種がある。

●食品加工機械、医療・医薬：衛生、洗浄性
●半導体・情報、精密成型：クリーンルーム対応、完全オイルフリー場
●飲料、製缶・包装機械：水場、衛生、洗浄

実用化されている代表的な具体例を図 1.3.3 及び図 1.3.4 に示す。

図 1.3.3 は鶏肉の脱骨機械で、肉のカッター用に水圧モータを 10 台搭載している。近年、食の安心・安全の観点から食品の製造ラインの衛生的な対処が強く要求されている。本機械は加工処理の途中あるいは終了後、手際よく機械の丸洗い洗浄が可能である。従来は電気駆動のため電気パーツを取り外して洗浄作業を行ってきたため、その都度ラインを停止させていた。ADS 搭載によって、衛生的に生産性の向上が計られた。

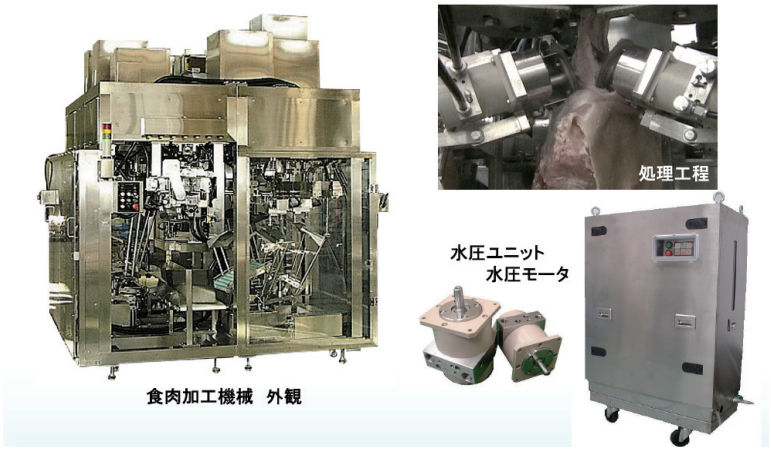


図 1.3.3　食肉加工機械（KYB ｶﾀﾛｸﾞ）

図 1.3.4 は、半導体ウエハの IC チップの保護膜を成型するプレスを示す。初期は油圧駆動であったが、クリーンルームでの油漏れが理由で電気駆動が採用された。しかし、プレス動作の直線運動を行う場合、電気モータの回転を両サイドの二本のボールネジを介して直径 300ｍｍの金型を相対して圧縮する。この場合金型が両サイドで支持するため金型中央部に歪が発生して繰り返し精度に支障をきたす。また、ボールネジのグリースによる周囲の汚染がある。ADS では 300ｍｍ直径のシリンダで直圧するので歪の問題は発生しない。更に油圧の場合、温度によって油の粘度は大きく変化し製品にバラツキが発生し製品歩留を下げる。水の粘度は温度に対して変化が極めて小さい。この他 ADS の応用は、河川のゲートの開閉、レジャーでは可動床プール（子供、大人、シンクロ、水球用などに、水圧で床を上下に動かし、深さを変える）などの応用が報告されている。

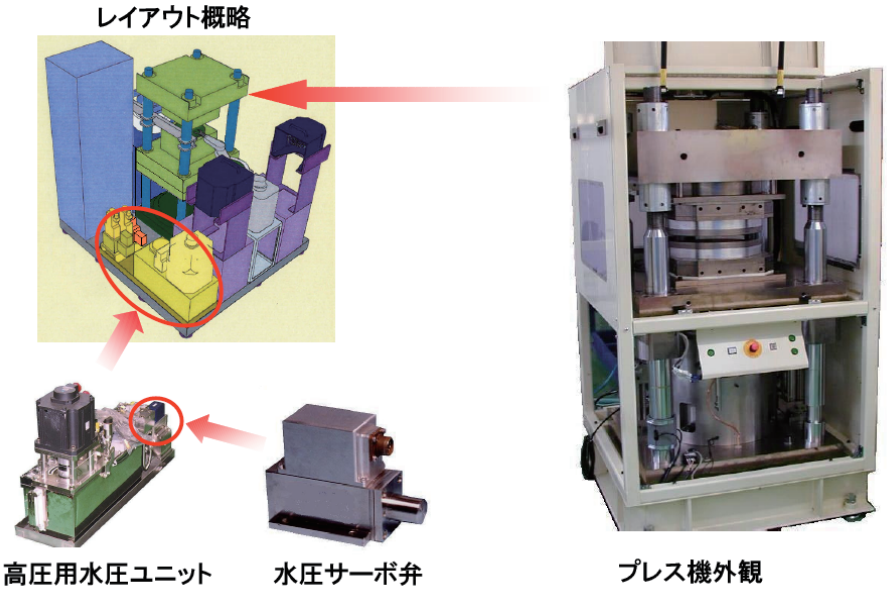


図 1.3.4　半導体ウエハプレス機（KYB ｶﾀﾛｸﾞ）

②特殊環境分野

原子力発電システムは対放射能から水中での作業が要求される。一次側エネルギー供給サイトの燃料棒駆動システムがあるが、二次側エネルギー消費作業の炉心周辺装置、炉心内部検査装置、放射性廃棄物処理、廃炉技術への応用。今後予想される原子炉の廃棄時の作業機械、自動機械への応用が期待できる。

③自然環境保護分野

河川・臨海近隣の駆動機械、水中作業機械、海洋開発機械への応用。

河川ゲートやポンプ機場のゲート、河川の魚道床の昇降などでは既に実績が出始めている。水中、海中機械では近年臨海の海底資源発掘作業が話題になり始めている。海外では計測器を海中深度の任意の深さに定めてそのコントロールに ADS が利用されている例が報告されている。イギリスで ADS の開発は日本と同様 1975 年頃開始されており、開発に着手した機器は、北海油田採掘、発掘に用いる海中工具に端を発している。

④防災・対人安全分野

防災・対人安全分野としては、主に下記のものがある。

● 消防機器、レスキュー機器、医療・**福祉機器**、高齢化

レスキュー機器分野としては、自治省令第 22 号の中の「救助の装備及び配置」で油圧機器の使用が規定されているため、水圧機器の採用は現状では困難である。しかし、火災現場であれば本来「水圧駆動」が好ましく、規制緩和による水圧導入の可能性は極めて高いと考えられる。既にイギリスでは具体的商品が紹介されている。国内では舶用の消火設備に水圧駆動システムを採用した事例や、水圧駆動消火ロボットの研究開発も行われており、充分導入が期待できる有望分野(業界)といえる。

● 身障者対応住宅設備機器

（注）下図に示す用途は、水道水圧を利用したもので過去に実施した「水道配管網圧力を利用した次世代型アクアドライブシステム（UniADS）の開発に関するフィージビリティスタディ」の成果の一部である。

図 1.3.5　入浴介護ﾘﾌﾄ

図 1.3.6　入浴用昇降ﾘﾌﾄ

●劇場、舞台の設備駆動

●スポーツ、レジャー（稼動床プール、体感マシーンなど）

⑤防爆安全分野

●3K（暗い、汚い、キツイ）の排除：一般産業・生産/加工機械生産現場、鋳物

以上、ADS の特長（環境性、高応答性、高出力、コンパクト性等々）を活かせる二次側エネルギー消費システム分野（機器・装置）を展望した。中には、現在一部実用化されているものもあるが、まだ ADS の利点の認知度が低く、実績が少ない。したがって今後、ADS の適用分野を拡大するためには ADS に関する認知度を高めるための絶え間ない努力とこれまでの ADS の実績を積極的に広報宣伝する必要がある。技術的観点からは低温対策、防食／腐食、シール技術、信頼性/寿命、イニシャルコストの低減、メンテナンス評価、水質管理技術、LCA 評価などを明示する必要がある。

第２章　新・水圧技術（ADS）の基盤技術となる「ロボティクス技術」調査

前章において、一次側エネルギー発生システム及び二次側エネルギー消費システムにおけるエネルギー有効利用の目的で、環境調和に優れた新・水圧技術（ADS）を応用することの有効性が示された。

ADS の一次側エネルギー発生システム及び二次側エネルギー消費システムへの応用を考えたとき、その基盤となるシステムは、一次側エネルギー発生システムにおいては排熱を利用したボイラーの蒸気を使った蒸気タービン周りの駆動制御システムであり、具体的に火力発電システムでは、ガスタービンの燃料制御弁及び蒸気タービンの蒸気加減弁や緊急遮断弁の駆動制御が主な機能となる。つまり基本は弁の位置と速度を制御するマニピュレータシステムとみなすことができる。また、二次側エネルギー消費システムでは電気エネルギーを消費して生産活動をする一般産業分野で使われる機械・装置の駆動制御システムであり、分野に応じて多種多様のものが考えられるが、共通する基本技術は一次側エネルギー発生システムの場合と同様にロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムに集約できる。それを実現するための ADS ロボティクスシステムは水圧サーボ弁または水圧比例弁を用いた水圧サーボシステムで構成される。

本章では、ADS ロボティクスシステムの実現の可能性を、構成する水圧機器と、システム構成及び制御技術の面から調査研究した。

２．１　水圧機器－シリンダ、モータ、バルブ、アキュムレータ、シール･パッキン等々－

ここでは ADS ロボティクスシステムを構成するために必要な水圧サーボシステム及び水圧源ユニットを含む周辺装置の構成に必要とされる水圧機器について、その現状と今後の課題等について調査・分析を行った。具体的には、水圧サーボ弁、水圧比例弁、シリンダ、水圧モータ及びそれらを駆動する水圧源を構成するために必要となる、ポンプ、リリーフ弁、方向切換弁、アキュムレータ及び各機器に組込まれその性能に大きな影響を及ぼすシール・パッキンについて調査を行った。

２．１．１　調査方法

調査対象とする機器の基本仕様は､一次側エネルギー発生システムへの応用においては、東京電力（株）川崎火力発電所の見学で知り得た蒸気タービン周りの駆動制御用油圧システムの仕様に基づいて設定し、二次側エネルギー消費システムへの応用に関しては、一般産業用として広く応用がみられるロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムとし、その基本モデルとして本調査研究で試作を目指す ADS ロボティクスシステムの基本構想（２．２節参照）に基づいて設定した。これらに適用できる水圧サーボシステムを構成するために必要となる水圧機器について、水圧機器メーカのカタログ及び「平成 15 年度アクアドライブ技術の実用化に関する調査研究報告書」等から、採用可能な機器を抽出し、機能・性能について調査検討するという方法で行った。

２．１．２　調査対象とする機器の基本的仕様

東京電力（株）川崎火力発電所の見学で得た情報及び本調査研究で試作を目指す ADS ロボティクスシステムの基本構想に基づいて、本調査研究で対象とする水圧サーボシステムを構成するために必要となる主な水圧機器について、それぞれ要求される基本的仕様を表 2.1.1～表 2.1.7 に示すように設定した。

水圧モータに関しては、東京電力（株）川崎火力発電所の火力発電システムでは実用されていなかったが、二次側エネルギー消費システムへの応用を考慮に入れて調査対象に含めた。

表 2.1.1 水圧サーボ弁、比例弁に対する基本仕様

	一次側エネルギー発生システムへの応用	二次側エネルギー消費システムへの応用
定格作動圧力	14 MPa	14 MPa
定格流量	120 L/min	20 L/min
応答周波数	60 Hz (-3 dB)	60 Hz (-3 dB)
使用温度範囲	2～60℃	2～50℃

表 2.1.2 水圧シリンダに対する基本仕様

	一次側エネルギー発生システムへの応用	二次側エネルギー消費システムへの応用
最高使用圧力	14 MPa	14 MPa
ピストン径	φ160 mm	φ40 mm
ロッド径	φ100 mm	φ16 mm
最大ストローク	250 mm	200 mm
最大速度	0.2 m/s (240L/min 相当)	0.1 m/s (7.5 L/min 相当)
最小速度	0.01 m/s	0.01 m/s
使用温度範囲	2～60℃	2～50℃
寿命（走行距離）	500～1000 km	300 km

シール・パッキンに対する基本仕様は、上記シリンダの仕様を実現できるものであることとした。

表 2.1.3 水圧モータに対する基本仕様

	一次側エネルギー発生システムへの応用	二次側エネルギー消費システムへの応用
最高使用圧力	該当例なし	14 MPa
最大供給流量		15～20 L/min
最大回転速度		1500 rpm
最小回転速度		500 rpm

表 2.1.4 水圧ポンプに対する基本仕様

	一次側エネルギー発生システムへの応用	二次側エネルギー消費システムへの応用
タイプ	アキシャルピストン型	アキシャルピストン型
吐出し圧力	14 MPa	14 MPa
吐出し流量	180～200 L/min	20～25 L/min
使用温度範囲	2～60℃	2～50℃

表 2.1.5 リリーフ弁に対する基本仕様

	一次側エネルギー発生システムへの応用	二次側エネルギー消費システムへの応用
設定圧力範囲	～14 MPa	～14 MPa
定格流量	200 L/min	20 L/min
使用温度範囲	2～60℃	2～50℃

表 2.1.6 電磁切換弁に対する基本仕様

	一次側エネルギー発生システムへの応用	二次側エネルギー消費システムへの応用
定格圧力	14 MPa	14 MPa
定格流量	240 L/min	20 L/min
使用温度範囲	2～60℃	2～50℃

表 2.1.7 アキュムレータに対する基本仕様

	一次側エネルギー発生システムへの応用	二次側エネルギー消費システムへの応用
最高使用圧力	14 MPa	14 MPa
ガス容積	2 L	0.3 L
使用温度範囲	2～60℃	2～50℃

２．１．３　水圧機器の調査結果

前節に示した”調査対象とする機器の基本的仕様”をほぼ満足する性能をもち、現実に入手可能な具体的機器を抽出し、企業名と主な仕様をそれぞれ表 2.1.8～表 2.1.15 に示した。そして、現状分析した結果をコメントした。

（１）水圧サーボ弁、水圧比例弁

表 2.1.8 水圧サーボ弁

	ＫＹＢ（株）
定格作動圧力	14 MPa
定格流量	50 L/min
応答周波数	50～60 Hz (-3 dB)
使用温度範囲	2～50 ℃

表 2.1.9 水圧比例弁

	ＫＹＢ（株）	ダンフォス（株）
定格作動圧力	7 MPa	14 MPa
定格流量	50 L/min	30 L/min
応答周波数	不明	不明
使用温度範囲	2～50℃	2～50℃
その他		比例電磁流量調整バルブであり、方向切換え機能はない

サーボ弁に関してみれば、作動圧力については基本的仕様を満足できるが、一次側エネルギー発生システムへの応用に対しては流量的に不足しており、120 L/min 程度の流量制御時に応答周波数 60 Hz を得るためには現状より大容量のサーボ弁の開発が必要である。既存のサーボ弁を基に定格流量のシリーズ化は当該メーカで予定しており、大容量サーボ弁の製品化は今後進むものと考える。

二次側エネルギー消費システムへの応用に対しては既存のサーボ弁を用いることで ADS ロボティクスシステムの基本的機能を実現することは十分可能であると考える。

低価格な水圧サーボシステムを目指して水圧比例弁の開発がいくつかの企業と研究機関で進められているが、現時点では作動圧力及び応答周波数等の面で、本調査研究で試作を目指す ADS ロボティクスシステムに適用できるものはない。

表 2.1.10 水圧シリンダ

	（株）堀内機械	（株）村上製作所	（株）山本水圧工業所
最高使用圧力	14 MPa	14 MPa	21 MPa
シリンダ内径	40～500 mm	50 mm	240 mm
最大ストローク	4000 mm	300 mm	1000 mm
速度範囲	0.008～0.3 m/s	0.067 m/s	不明
寿命（走行距離）	約 300 km	約 300 km	不明

圧力に関してはいずれも満足できる。またシリンダ内径、ロッド径、ストローク等に関しては仕様に適合するものを製作することは可能であり、一次側エネルギー発生システム

及び二次側エネルギー消費システムのいずれへの応用に対しても ADS ロボティクスシステムの基本的機能を実現するための水圧シリンダは入手可能である。

（２）シール・パッキン

水圧専用のシール・パッキンとして製品化されたものはなく、現状では既存の油圧あるいは空気圧用の適したものが水圧機器に使用されている。平成 18 年度の「水道配管網圧力を利用した次世代型ユニバーサルアクアドライブシステム（UniADS）の開発に関するフィージビリティスタディ」の中で実施したシリンダの走行試験結果によれば、比較的低圧（1.5 MPa）での試験であったが、パッキン材質に HNBR を使用し、水膜が形成されやすいリップ形状を採用し、併せてウエアリング材質に樹脂を用い、寸法変更により面圧の軽減を図る等の対策を施した結果、600 km 以上の寿命（走行距離）を達成した。14MPa 程度の圧力に対してはしゅう動面に自己潤滑性をもつ樹脂を用いた組合せタイプのシール・パッキン（例えば（株）阪上製作所製の ST シールタイプ）が推奨されており、これらを使用することで ADS ロボティクスシステムの基本的機能を実現するための水圧シリンダを構成することは可能であると考える。

（３）水圧モータ

表 2.1.11 水圧モータ

	ダンフォス（株）	フェナー社
タイプ	アキシャルピストン型	アキシャルピストン型
最高使用圧力	14 MPa	16 MPa
押しのけ容積	4～12.5 cm^3/rev	3.1 ～225 cm^3/rev
最大流量	37.5 L/min	430 L/min
最大回転速度	3000～4000 rpm	2000～4000 rpm
最小回転速度	300 rpm	500 rpm
使用温度範囲	2～50℃	2～50℃

	ＫＹＢ（株）	ダンフォス（株）
タイプ	ベーン型	ベーン型
最高使用圧力	2 MPa	5 MPa
押しのけ容積	7.6 cm^3/rev	160 cm^3/rev
定格流量	12 L/min	36 L/min
最大回転速度	1500 rpm	200 rpm
最小回転速度	500 rpm	15 rpm
使用温度範囲	2～50℃	2～50℃

アキシャルピストン型で 14～16 MPa の圧力に対応できるものが存在する。二次側エネルギー消費システムのロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムへの応用を考えたとき、多くの場合低速回転での駆動が必要とされる。現状では減速機構を付加する

ことで対応できており、基本的機能を実現することは十分可能であると考える。使用圧力は低いがベーン型水圧モータも存在し、用途に応じて使用可能である。

（４）水圧ポンプ

表 2.1.12 水圧ポンプ

	ＫＹＢ（株）	ダンフォス（株）
タイプ	アキシャルピストン	アキシャルピストン
最高吐出し圧力	16 MPa	10～18 MPa
押しのけ容積	15 cm^3/rev	約 2～80 cm^3/rev
最大吐出し流量	22.5 L/min	2～112 L/min
使用温度範囲	2～50℃	2～50℃

一次側エネルギー発生システム及び二次側エネルギー消費システムのいずれへの応用に対しても、ADS ロボティクスシステムを実現するためには高圧で比較的脈動の少ないアキシャルピストンポンプが現状では最適である。一次側エネルギー発生システムへの応用に対しては単独のポンプでは流量的に不足するが、複数台並列使用することで対応できる。したがって、既存製品のアキシャルピストンポンプを用いて基本的機能を実現するシステムを構築することは可能である。

（５）水圧リリーフ弁

表 2.1.13 水圧リリーフ弁

	ダンフォス（株）	マルヤマエクセル（株）
タイプ	ダイレクトタイプ	ダイレクトタイプ
定格圧力	2.5 ～14 MPa	1～50 MPa
流量	～120 L/min	～275 L/mn
使用温度範囲	2～50℃	不明

	WALTER VOSS 社	
タイプ	ダイレクトタイプ	バランスピストン型
定格圧力	～31.5 MPa	～31.5 MPa
流量	～40 L/min	～1,200 L/min
使用温度範囲	不明	不明

圧力、流量の基本的仕様を満たすものは入手可能である。多くはダイレクトタイプであり、一次側エネルギー発生システムへの応用に対しては大流量のリリーフ弁が要求され、圧力オーバーライドが比較的小さくコンパクトなバランスピストン型のリリーフ弁が望まれるが製品化されたものは少ない。WALTER VOSS 社の製品にバランスピストン型リリーフ弁が存在し入手は可能である。他にも現在開発中のものがあり、今後製品化が進むも

のと思われる。

二次側エネルギー消費システムへの応用に対しては、比較的入手が容易なダイレクトタイプのリリーフ弁を用いることで ADS ロボティクスシステムの基本的機能を実現することは可能である。

（６）水圧電磁切換弁

表 2.1.14 水圧電磁切換弁

	ダンフォス（株）	廣瀬バルブ工業(株)	WALTER VOSS 社
定格圧力	14 MPa	14 MPa	31.5 MPa
定格流量	30 L/min	60 L/min	1～4,500 L/min
使用温度範囲	2～50℃	5～60℃	不明

作動圧力については基本的仕様を満足できるが、流量については一次側エネルギー発生システムへの応用に対して不足するものが多い。大流量の水圧電磁切換弁としてWALTER VOSS 社のパイロット作動型の電磁切換弁があり、それらの中で一次側エネルギー発生システムへ応用できるものは入手可能であると考える。

二次側エネルギー消費システムへの応用に対しては、比較的入手が容易な既存の水圧電磁切換弁を用いることで ADS ロボティクスシステムの基本的機能を実現することは十分可能である。

（７）アキュムレータ

表 2.1.15 アキュムレータ

	日本アキュムレータ（株）	ＮＯＫ（株）
最高使用圧力	5～25 MPa	3.4～34.3 MPa
ガス容積	0.1～160 L	1～160 L

一次側エネルギー発生システム及び二次側エネルギー消費システムのいずれへの応用に対しても現状の機器で十分に対応可能である。

２．１．４　調査結果のまとめと今後の課題

一次側エネルギー発生システム及び二次側エネルギー消費システムへの ADS の応用において共通する基本技術はロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムに集約できる。それを実現する水圧サーボシステムを構成するために必要となる主要な水圧機器の入手可能性と基本性能を調査した結果、今後試作を目指す ADS ロボティクスシステムの基本モデルは現状で入手可能な水圧機器により構築することができ、目標とする機能の実現を検証することは可能であると確認できた。ADS を用いたロボティクスシステムはこれまでに実現された例がなく、今後計画する試作モデルによりその機能の実現が確認できれば、一次側エネルギー発生システムでの ADS ロボティクスシステムの応用はそのスケールアップにより可能となるものと考える。

一次側エネルギー発生システムで使用される機器に対しては一般産業用に比べより高い信頼性が要求される。また高温環境で使用される可能性が考えられる。東京電力（株）川崎火力発電所の蒸気タービン周りの駆動制御システムで要求される基本仕様に基づいて今回の水圧機器の調査結果をみると、今後の課題として次のようなことが挙げられる。水圧サーボ弁、水圧比例弁、電磁切換弁においては大流量化、リリーフ弁では大流量に適用できコンパクトで圧力オーバーライドの小さいバランスピストン型リリーフ弁の製品化、水圧シリンダ、シール・パッキン及び水圧ポンプでは長寿命化と高信頼性化が主要な課題として考えられる。高温環境下での使用を考えた場合、特にシール・パッキンに関して高温状態での特性の把握が必要となる。水圧モータに関しては、一次側エネルギー発生システムへの油圧モータの応用事例が見当たらなかったためその要求仕様の特定ができなかったが、ロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムへの応用を考えた場合、一般に低速・高トルクの駆動が要求されるため、減速機構の小型軽量化と高効率化、更には低速・高トルク水圧モータの開発が必要である。

２．２　システムと制御

本節では 1.1 節で述べた一次側エネルギー分野で回収されたエネルギーを利用して水圧源を駆動し、ADS ロボティクスを構成するアクチュエータを制御するという観点から、システムと制御についてまとめる。具体的にはサーボ弁による水圧シリンダあるいはモータの制御を行うための制御システムの設計及び達成される性能について述べる。これらの結果は今後 ADS ロボティクスを実現、応用する上での一つの評価指標となる。

２．２．１　発電所内及び一般産業用機械における ADS ロボティクス利用の有効性

発電所内の発電サイクルにおいては、現在最も効率が良いとされる MACC 発電（More Advanced Combined Cycle：東京電力㈱川崎火力発電所 1,500℃級コンバインドサイクル発電）においても熱エネルギー変換効率は 60%未満に留まっている。そこでは主に復水あるいは冷却水が多く利用されており、今後これらのもつ熱エネルギーを更に有効活用する必要がある。一方発電所内にはタービンブレードの迎角制御、緊急遮断装置制御、高低圧蒸気の制御、流体制御のための制御弁及び所内の機器メンテナンス装置の駆動等、多くのアクチュエータ制御ニーズがある。これらの多くは油圧あるいは空気圧で駆動されているが、従来廃棄していたエネルギーを活用して圧力のエネルギーとして回収することができれば、完全オイルフリーによる高い環境調和性と CO_2 排出の低減化、省エネルギー化、省資源化に優れた水圧システムを適用する効果は大きい。同時に水のもつ非燃性は防災上も非常に有利であり、この観点からもメリットがある。この意味で ADS ロボティクスは一般産業用機械への適用も含むシステムとして環境適合度が高い。

本節では精密で操作性に優れ、小型、高速、高出力で安全性を有する ADS ロボティクスシステムの基本的な構造及び制御に関して得られている成果をまとめ、発電所内及び一般産業用機械への適用の可能性について考察する。

２．２．２　制御仕様

発電所内及び一般産業用機械においては多くの制御アクチュエータが存在するが、On-Off 動作するものを除き、多くは精密な位置決めあるいは速度制御が要求される。特に発電所内においては、表 2.2.1 のような仕様が挙げられる[1]。

表 2.2.1　発電所内において必要とされる流体制御
アクチュエータとその目的及び仕様

アクチュエータ	用　途	圧力源元圧	目　的	期待される制御精度
水圧シリンダ	各種弁開度制御，タービンガバナ制御，タービンブレード角度制御，メンテナンス機器制御	3-50 MPa	位置制御	全ストローク 0-250mm に対し 100μm オーダ
			速度制御	最大でも 50mm/s 程度
			力制御	0-15kN 程度
水圧モータ	各種弁開度制御，メンテナンス機器制御，エレベータ駆動		角度制御	1°オーダ
			速度制御	数 10-1000rpm
			トルク制御	データなし

以下では水圧サーボ弁をキーデバイスとして水圧シリンダ及び水圧モータの制御を行うことをイメージし、例として表 2.2.2 に示すような制御仕様への適用を考える。なお、ここでは一般産業用機械への応用も含めた仕様に対応するため､圧力源は 14MPa とした。これらは具体的には、発電所内での利用のうち非常に重要なタービンガバナの制御及びメンテナンス機械用ブーム制御への適用を想定したものである。

表 2.2.2　想定する流体制御アクチュエータの制御仕様

アクチュエータ	用途	圧力源元圧	目的	期待される制御精度
水圧シリンダ	タービンガバナ制御	14MPa	位置制御	全ストローク 0-200mm に対し 100μm オーダ、整定時間 4s
水圧モータ	メンテナンス機械のブーム角度制御		角度制御	数回転に対し 0.1° オーダ、整定時間 4s

２．２．３　制御系設計

本節では表 2.2.2 に示した制御仕様に対し、これまでに提案されている制御系とそれにより得られた制御性能をレビューする。

２．２．３．１　サーボ系の制御

ADS ロボティクスシステムの駆動は､いかに複雑な仕様であっても最終的には直線運動を行うシリンダ制御及び回転運動を行うモータ制御の二つの組合せに分解される（図 2.2.1)。これらそれぞれに目標値を与え、直線及び回転運動の誤差をなくすように制御系を構成したシステムを**サーボ系**と呼ぶ。以下ではこのサーボ系の効率的な制御を目的として、これまでに提案、検討された具体的な内容についてまとめる。

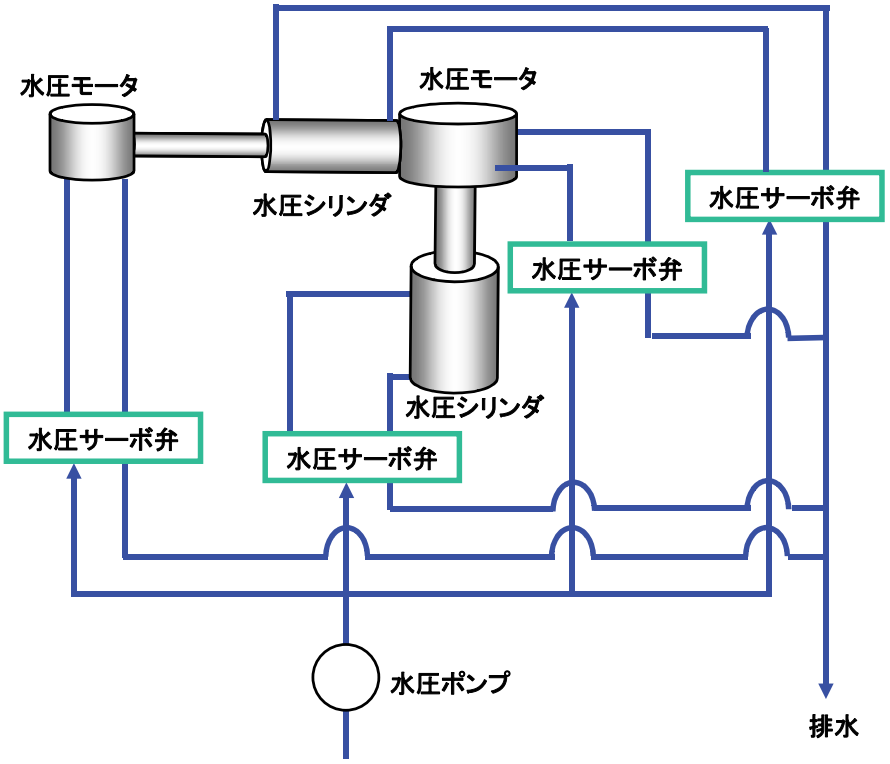


図 2.2.1　ADS ロボティクスのイメージ
（シリンダとモータの組合せ）

一般に機械システムの制御は、ある程度の負荷変動あるいはモデル化誤差（パラメータ変動、摩擦、内部漏れ流量及び計測ノイズ等）が存在しても所望の目的を達成するように設計される。これらの設計は具体的には PID 制御器のパラメータの決定あるいは様々な制御理論に基づいた線形/非線形制御器の設計に帰着される。このうち前者の PID 制御では多くの運転条件あるいは負荷条件下で試行錯誤的に準最適な性能を達成するような三つのパラメータ（比例、積分及び微分ゲイン）が決定されるが、現場設計者の経験及び勘に基づくケースが多く、一般的に効率的に制御パラメータの設計を行うことが難しい。同時に制御ループを多重にする場合も多く、その場合には更に設計工数が大きくなるために状況は困難なものとなる傾向がある。これに対し後者はセンサ設置の必要性等も含めて制御器の構成がやや複雑になる一方、事前の設計段階から負荷変動やモデル化誤差の影響をある程度考慮、抑制することが可能で、いわゆる“大崩れしない”頑健な（ロバストな）サーボ系を設計できるのが特長である。近年の半導体技術及び IT 技術の急速な進歩によりユーザインターフェイスの向上と導入価格の低下と併せ、実現が容易になりつつある。本調査研究でも後者をサーボ補償器の設計に適用する。

具体的な設計理論はいくつか提案されているが、ここでは適用の可能性の高い手法の代表として以下を考える。

（１）H_∞制御器

（２）外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御器

（３）適応制御器

（４）その他（モデル予測制御器等）

以下ではこれらについて概説する。

（１）H_∞制御器

目標信号と制御対象からの出力の誤差信号のパワー比、あるいは外乱信号のパワーと評価信号のパワーの比として定義されるシステムの H_∞ノルムと呼ばれる量を最も小さくするように補償器を設計する方法で、これにより想定される最大のモデル化誤差に対してどの程度の性能劣化が起こるかを見積もった上での設計が可能となる。ADS ロボティクスへの適用ではこの理論的枠組みは、事前の周波数応答の計測結果から設計の数学モデル（公称値モデル）を見積もり、アクチュエータ内の静摩擦及びクーロン摩擦、動特性変動、物理パラメータ変動、ホース長等による影響が存在しても制御仕様を達成できる補償器を設計する問題に帰着される。多くの場合これらの不確かさの影響は低周波帯域で支配的であり、一方計測外乱等のノイズは高周波成分を有するため、補償器のもつべき特性を適切な周波数帯域で分離して設計する問題に帰着させることが一般的に行われている。ただし負荷変動及びモデル化誤差は常にこれが最大の状態にあることを仮定しているため、得られた補償器がやや保守的になる傾向があり、速応性に関して所望の性能を満たせない場合もあり得る。この場合にはシリンダ位置誤差だけでなくシリンダ位置誤差の積分あるいは速度誤差等を評価信号に含める等の修正を行う方法も種々提案されている。最近では設計 CAD パッケージが広く一般化しており、設計者が理論的バックグラウンドを詳細に知ることなく利用できるようになってきている。水圧サーボシステム制御への適用では、後に述べるように非常に広い範囲の目標値に対応させた結果も報告されている[2]-[4]。

（２）外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御

（１）で述べた公称値モデルと実際の制御対象との信号上の差を、個々の要因に切り分けることなく全て外乱の影響とみなし、これを一旦ローパスフィルタに通して高周波成分を除去した後に制御入力の一部により打ち消すことにより、閉ループ系をほぼ公称値モデルに近似して取扱う方法を外乱オブザーバによる補償と呼ぶ。この手法は構造が明確で理解しやすいために、産業界でも広く応用が進んでいる[5][6]。ただしアクチュエータ内の摩擦特性やサーボ弁における漏れ流量等の非線形性の影響の大きいことが特徴の水圧システムにおいては、外乱オブザーバのみによる非線形項の補償だけでは所望の制御特性が得られないことが実験的にも明らかにされている[7]。

一方、スライディングモード制御手法は、補償器の一部を全く異なる二つの特性をもつものの間で適切に切換えることにより、補償器を含む制御システム全体の閉ループ特性に望ましい特性をもたせる手法である。具体的には水圧アクチュエータの望ましい位置（回転角度）、速度（角速度）特性を有する状態を設計超平面と呼ばれるもので表現しておき、この超平面に実際の位置（回転角度）あるいは速度（角速度）を近付けるように水圧サーボ弁を制御することで目的とする制御仕様を達成する手法である。この手法のもつモデル化誤差に対するロバスト性は広く知られており、産業における応用範囲も非常に広いことが知られている。しかしこの手法を適用する際の前提となる、ある構

造上の条件（マッチング条件：補償すべきモデル化誤差が制御信号の存在する経路にしか存在しないこと）は水圧アクチュエータの場合には満たさないことが多いため、実際に水圧サーボシステムに適用した場合には本来のロバスト性が発揮されないことも示されている[7]。

そこで実際にこれらを ADS ロボティクスに適用する際には、まず内側の制御ループで外乱オブザーバにより公称値システムとの誤差をできる限り補償し、同時にスライディングモード制御の前提を満たすようにシステムを近似した上で、外側の制御ループでスライディングモード制御を施して制御仕様を満足するという二段構えの構造をもつ補償器が提案される。この手法が実際に水圧サーボシステム制御に大きな性能改善効果があることが明らかにされている[7]。

（３）適応制御

制御対象の物理モデルパラメータが事前に入手できない場合には、制御対象の入出力信号からこのパラメータを推定し、制御仕様を満たすように補償器が制御信号を自動調整して生成する手法で、以前から非常に広い研究開発実績がある。特に（１）で述べたH_∞制御手法とは異なり、補償器が積極的に未知パラメータを推定してその影響を補償する構造を有するため、制御精度が比較的高いという特長をもつ。ただし外乱あるいは計測信号のもつノイズの影響が大きいため、低域通過フィルタを設置して良好な信号状態を確保するなど十分な対策を施す必要がある。更に ADS ロボテッィクスが本来もつ強い非線形特性、例えばアクチュエータの摩擦特性や内部漏れ等の影響に対しては、物理モデルの構造を線形と仮定した場合にはこれらを補償しきれず、制御系自体が不安定化する可能性もある。しかしモデル化を適切に行うことで非線形性を保証できる場合があり、水圧シリンダあるいは水圧モータの速度制御を行う場合には非常に良好な制御精度を発揮することが知られている[8]。

（４）その他の設計法

モデル化誤差が比較的小さい場合には、モデル予測制御手法が効果を発揮するものと考えられる。この手法は、ある時間ステップ分の未来の制御対象の予測値を制御対象の数学モデルを元に算出し、望ましい応答との誤差から逆算した入力のうち、次の一時刻のみの制御入力信号を印加するというステップを毎時刻に亘り繰り返し行うものである。与えられた予測区間に複数の目標点が存在する場合には、それらに対する予測値の誤差の最小自乗値を達成するものが制御入力信号の候補として選ばれるため、これは一種の最適制御に相当している。ただし状態変数や入力信号にも自由に制約を課すことができるのが大きな特長である。この手法は多くの計算量を要求するため、化学プラント、発電プラントあるいは船舶等の比較的時定数の長い制御対象に対して多くの実績[9]があるが、近年計算機のクロック数が急上昇したことにより、最近では比較的時定数の短い機械制御にも応用実績が増えつつある。水圧サーボ系の制御では、数学モデルの構造が比較的低い二次あるいは三次系であることから、この手法の適用可能性も検討する必要があると思われる。

２．２．３．２　水圧サーボシリンダ制御

水圧シリンダに対するサーボ系はこれまでにいくつかの応用実績があるが、ここでは精密プレス機への応用及び昇降装置への応用について概説する。

以下で述べる水圧精密プレス機は、デバイスの高密度・小型化が進む半導体の製造工程において､デバイス表面の絶縁､保護を目的とするパッケージ技術を実現するものである。金型を開いた状態で下金型に半導体ウェハを乗せ、ウェハ中央部に投入された樹脂材料を投入後、加熱された上下金型で半溶融状態になった樹脂をプレス作用によってウェハ表面に押し広げて加圧と加熱を行うプロセスを実現する必要がある。成形機の仕様は以下のようなものである[10]-[12]。

プレス力：100ton･f_{max}
プレス速度：0.01-20mm/s
高速移動時：75mm/s　（樹脂接触前）
成型有効ストローク：150mm

荷重制御の仕様は、3-100ton に対して誤差 1%という精密なものである。また速度制御仕様が各工程によって異なるが、最低速度範囲の 0.01-1.00mm/s に対して 0.05mm/s なる精度が指定されている。また図 2.2.2 及び図 2.2.3 に、成形機に用いられた水圧回路及び成形機の模式図をそれぞれ示す。

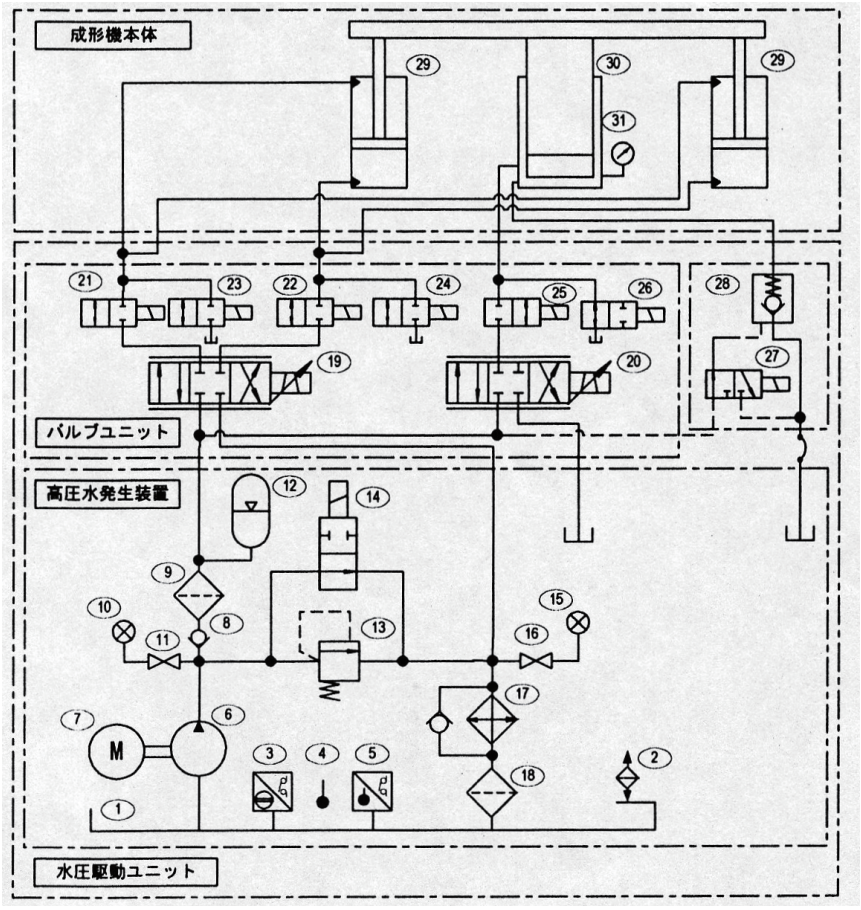


図 2.2.2　成形機に用いられた水圧回路[13]

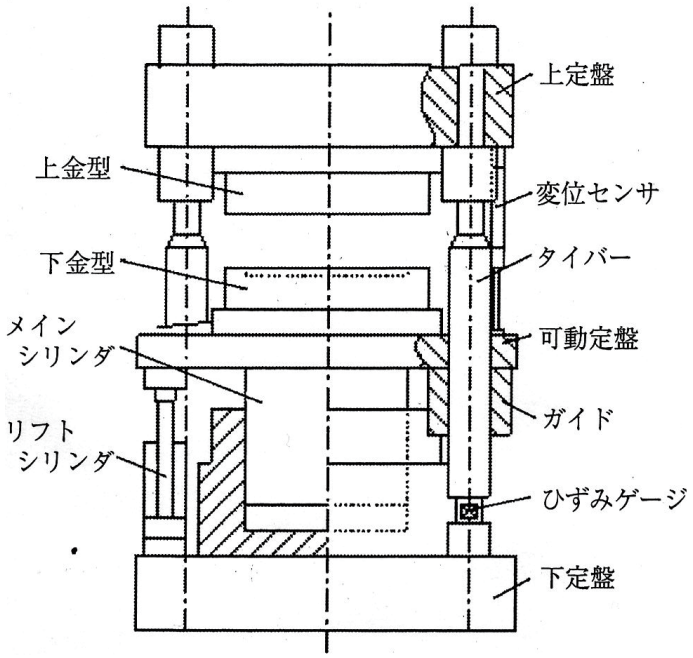


図 2.2.3　成形機の模式図

成形機本体の外観写真を図 2.2.4 に示す。成形機本体には、メインシリンダによる金型の速度及び加圧力制御、リフトシリンダの高速移動及び位置決め制御が要求される。これらの制御は水圧サーボ弁によってサーボ系を構成することで実現される。水圧ポンプには作動流体である水道水自体を潤滑に用いる自己潤滑方式の斜板式アキシャルピストンポンプが用いられており、圧力 13MPa、吐出流量 52.7L/min@1750rpm である。二つのサーボ弁はそれぞれメインシリンダ（内径 300mm、フルストローク 150mm）及びリフトシリンダ（内径 28mm、フルストローク 150mm）の駆動を行っている。

図 2.2.4　成形機の外観

制御理論を実現するキーデバイスとして用いた水圧サーボ弁の代表的な緒元を以下に示す。

最大使用圧力　14MPa
流量　　10L/min（供給圧力 7MPa、無負荷時）
周波数応答　　60Hz（供給圧力 7MPa）

このうち制御の観点から特に重要なものは周波数応答の値であり、この周波数が速応性の上限値を決定する。以下に述べる研究は全てこのサーボ弁を適用した結果である。

この研究では、サーボ弁とシリンダを接続する配管長の違い、サーボ弁の中立点における漏れ流量、プレス機のフレーム剛性及びウェハ上の樹脂の溶融状態等のモデル化誤差を考慮し、これらにロバストな荷重制御系を H_∞制御手法により構成している。なお、速度制御系の設計についてはここでは省略する。

以上の補償器により得られた結果を図 2.2.5 及び図 2.2.6 に示す。これらの図中では、目標速度をステップ状に 20-10-2-0.01mm/s と変化させており、また目標荷重も同様に 90-85-90-0ton･f と与えている。速度制御結果では低速制御時のスティック・スリップ現象も確認されず、目標速度に精度良く追従していることがわかる。また荷重制御結果においても増圧時・減圧時の両方で安定した結果が得られていることがわかる。特にプレス機の制御で問題となる荷重のオーバシュートについては、補償器内で抑制を行っている点に注意する。

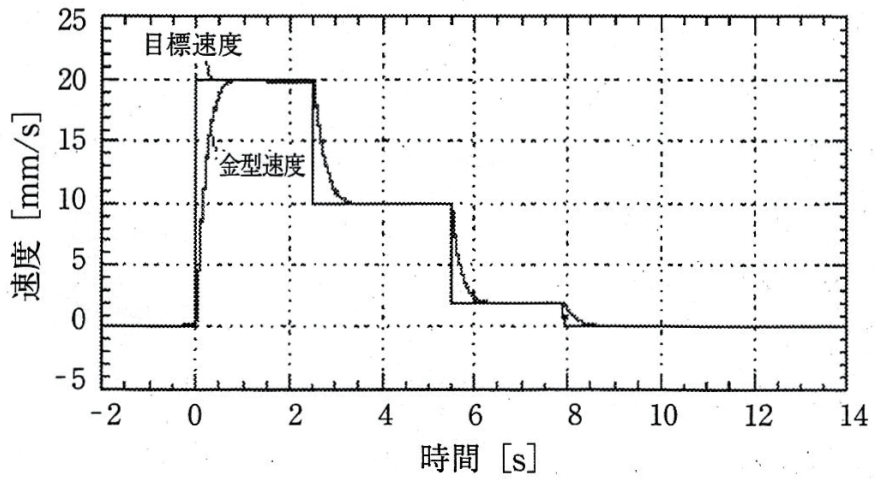


図 2.2.5　速度制御の目標値と実験結果

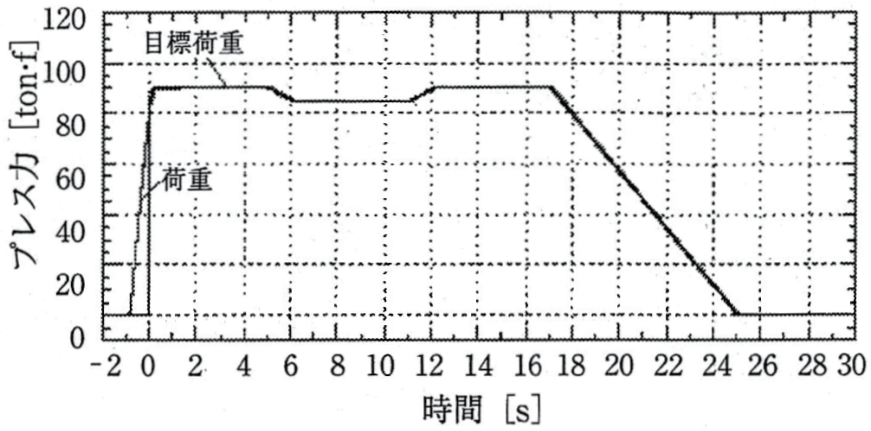


図 2.2.6　荷重制御の目標値と実験結果

次に 2 本の水圧シリンダの先端位置を同期制御することで大型の負荷の昇降を行う一般的な昇降装置への応用について述べる。水平設置した 2 本の二段型テレスコープシリンダはそれぞれに対応したサーボ弁を制御することにより位置制御されるが、使用したテレスコープシリンダはフルストローク 1000mm に対して 500mm の地点で有効断面積が不連続に変化するため、一定速度での位置制御や同期制御が難しいシステムとなっている。サーボ弁は、シリンダに組込まれた磁歪型センサからの変位情報を基に生成された制御信号により駆動される。この研究においては PID 制御ループを多重に構成し、かつ誤差に応じて制御ゲインを切換える方法を採用している。供給圧力を 7MPa、シリンダの動作速度は 16mm/s とし、2 本のテレスコープシリンダの偏荷重の有無に対する実験結果を図 2.2.7 に示す。

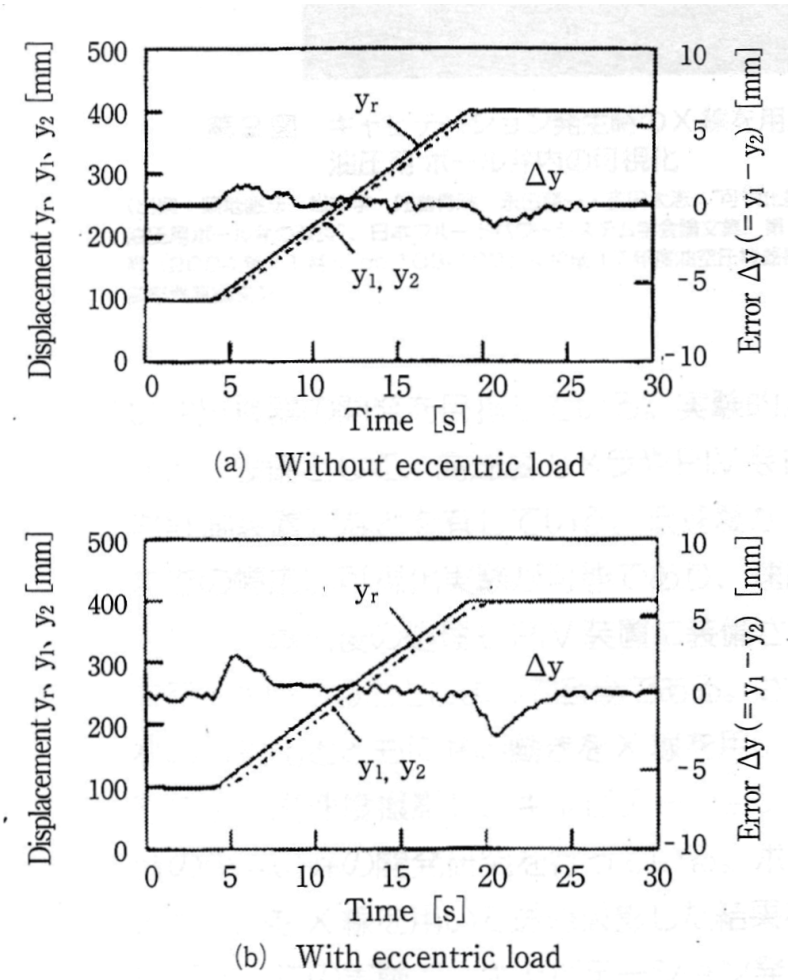


図 2.2.7　荷重制御の目標値と実験結果

実験結果より、偏荷重の有無における制御性能は加減速時に最も顕著に表れるが、次第に積分制御の効果が発揮されるために同期偏差が減少あるいは零に収束することが読み取れる。これは PID 制御でもある程度は水圧シリンダ制御に対してロバスト性が期待できることを示している。ただし一般的に PID 制御パラメータの決定には先述のように多くの工数が必要となることに注意する。

以上により発電所及び一般産業機械におけるタスクに対し、シリンダ制御においては表 2.2.2 に示した仕様を満足するような制御系の設計が十分に可能であると判断される。

２．２．３．３　水圧サーボモータ制御

水圧サーボ系においてはこれまで得られている応用実績が非常に少ないことが特徴である。これはシリンダの場合に比較して、モータの場合にはその構成上、内部に多くの摺動部を有し、またそこからの内部漏れ流量も無視できないため、これらの速度及び圧力に対する非線形性が強く、制御が難しくなることがその理由の一つと考えられる。ここでは実験室レベルの回転角度制御及び速度制御の成果及び知見について概説する。

まず代表的な水圧モータ単体の回転速度に対するトルク損失特性を、油圧モータと比較したものを図 2.2.8 に示す[14]。データ取得に使用したモータは Fenner 社製の斜板式アキシャルピストンタイプのもので、押しのけ容積は 6cc、最高使用圧力は 14MPa、定格回転

数は 1500rpm である。同図より、明らかに油圧モータよりも摩擦及び漏れによる損失が大きいことが読み取れ、更に低速度域における損失が非常に大きいことがわかる。これは低回転域ではスティック・スリップが発生し易いことを意味しており、回転角度制御においては目標値付近での制御精度劣化につながる。更に補償器が陽に積分動作を行う要素をもつ場合には、積分ワインドアップ現象の発生やリミットサイクルの誘起の可能性が高い。

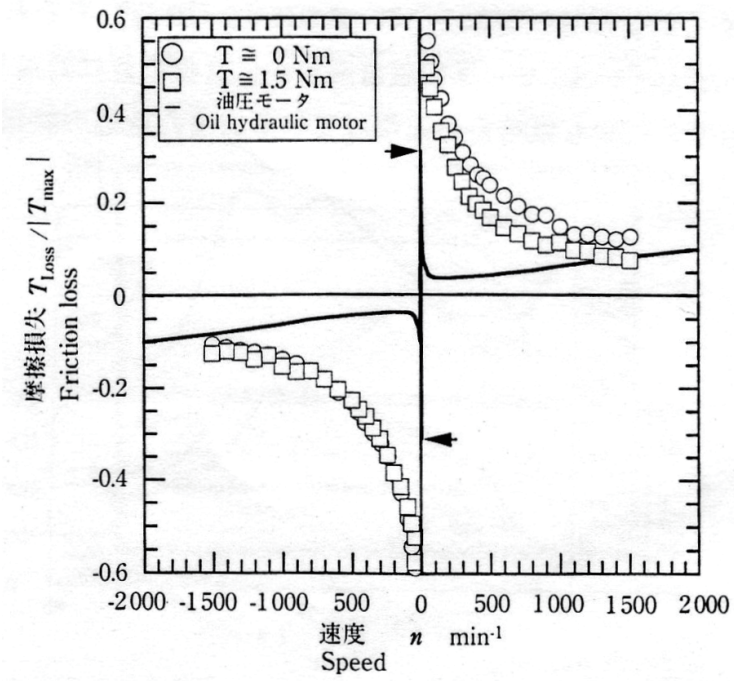


図 2.2.8　水圧モータの損失特性（文献[14]）

このような特徴をもつ水圧モータに対し、文献[14]では回転角度制御と速度制御に多重閉ループ型 PI 制御を適用した。図 2.2.9 に示した結果では、7 回転後停止時の定常角度偏差が 6° 程度残ることが示されており、摩擦や漏れ流量に関して何らかの補償が必要なことがわかる。

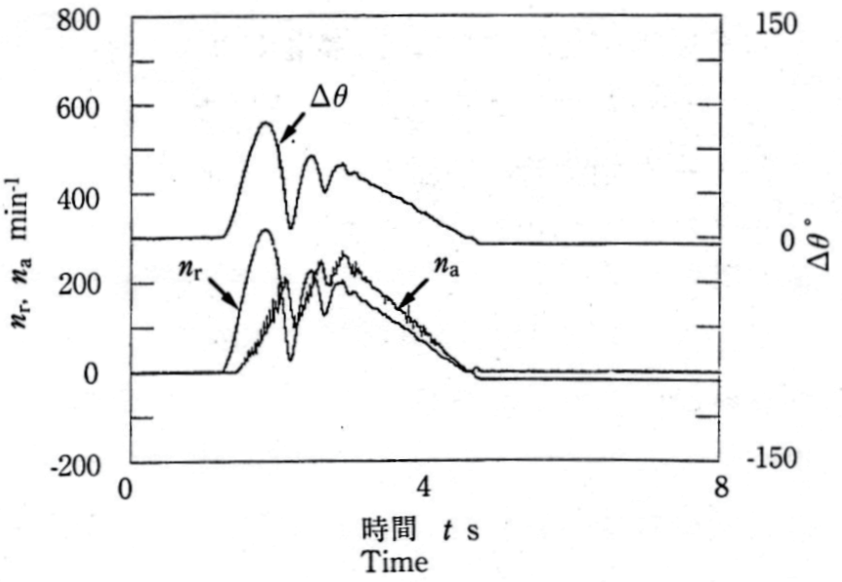


図 2.2.9　回転角度制御結果

（n_r：目標角度，n_a：実際の角度，$\Delta\theta$：角度誤差）

また同様なモータに対し、回転角度誤差に応じた PI ゲインを切換えるゲインスケジュール手法も行われたが、上記と同様に目標値付近で数°程度の大きな誤差が残ることが確認されている[15]。積分ゲインを大きくすることで解決はされるが、その分時定数が大きくなるというデメリットも存在する。

次に、2.2.3.1 節で述べたようなロバスト制御理論による制御系設計の結果を示す。同節で解説した H_∞制御器、外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御器、適応制御器は全て実験的に性能確認が行われているが、回転角度制御に関して最も制御性能が良好であった外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御器の場合の結果を図 2.2.10 に示す[7]。

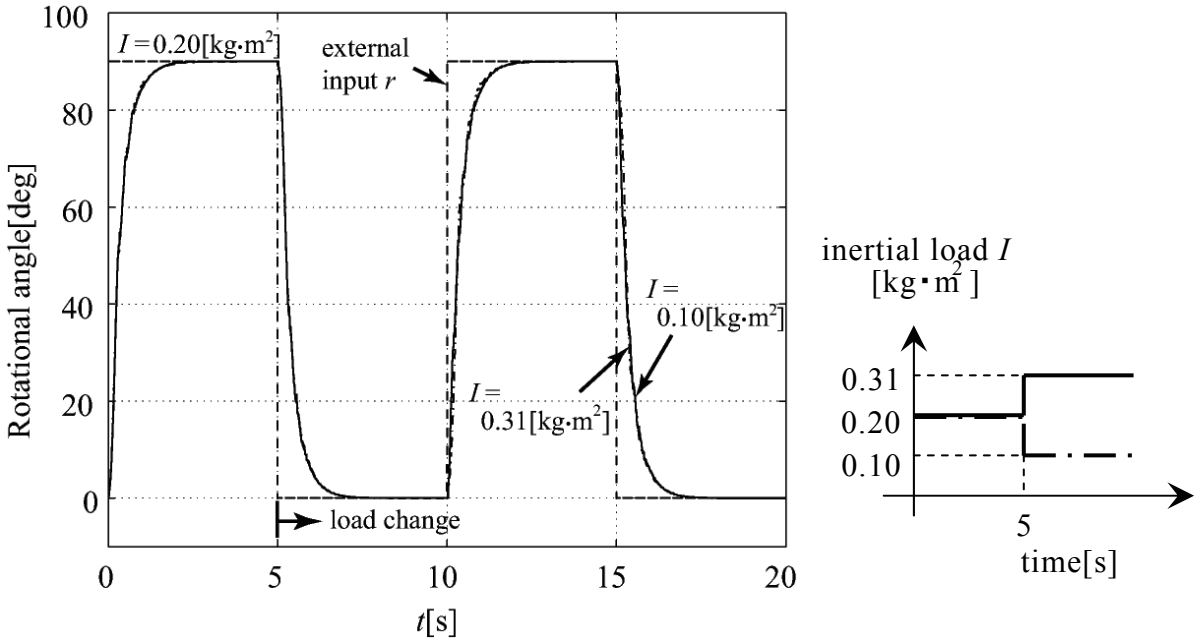


図 2.2.10　回転角度制御結果

供給圧力を 5MPa としたこの実験では、0-90°（周期 10s）でステップ状に時間変化する目標値を与え、負荷条件を実験中に切換えながら角度制御を行っているが、同図より読み取れるように負荷変化に関して非常にロバストで、ほとんど性能劣化を起こしていないことがわかる。定常偏差は 0.01°程度であり、これは実験に使用したエンコーダの分解能とほぼ同等であり、また目標角度の変化（10°、30°）に対しても変化は見られなかった。停止状態から比較的小さな角度の回転を行わせることは、一旦静止摩擦に打ち勝って回転が始まり、クーロン摩擦を補償しながら回転して再度目標値付近で静止摩擦を利用して停止するために制御的には難しい要素を含むが、結果は良好である。これはまず外乱オブザーバが公称値モデルと実際の制御対象とのモデル化誤差の影響を直接的に補償し、そこで補償し切れなかった要素に対して外側のスライディングモード制御による切換え制御がこれを補償するという二段構えの制御構造が効果を発揮していると考えられる。実際、目標値付近までの過渡応答中は外乱オブザーバによる補償の効果が大きく、目標値付近での微小な誤差の抑制は早い切換え周波数を有するスライディングモード制御器からの制御信号が支配的であることが確認されている。

更に回転速度制御においては、適応制御を用いた手法により最も良い結果が得られており、これを図 2.2.11 に示す[8]。

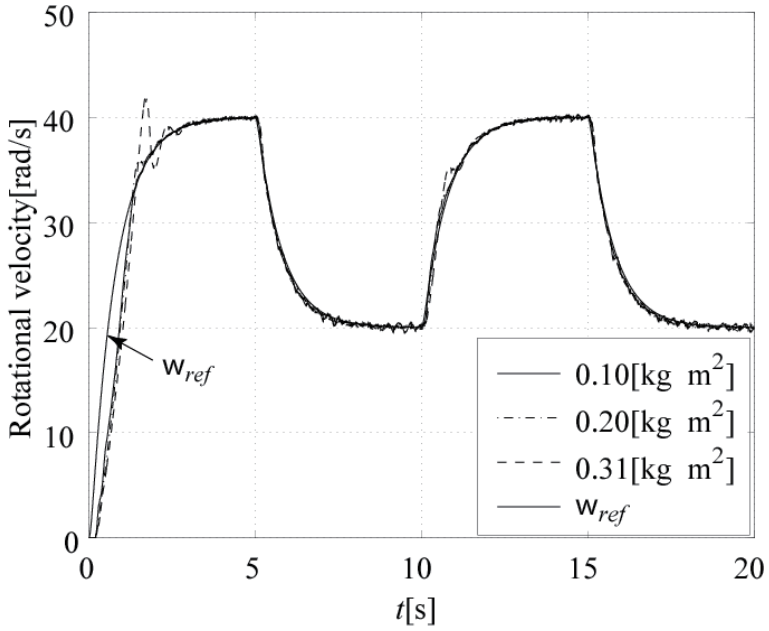


図 2.2.11　回転速度制御結果

この実験では供給圧力を 7.5MPa として目標値 20-40rad/s（周期 10s）でステップ状に時間変化する目標速度を与え、負荷条件を実験ごとに変化させながら制御特性を調べた結果である。速度制御においては、目標値の切り換り時期を除いて摩擦及び漏れ流量がほぼ一定値を取るようになるため、誤差を元に制御パラメータを随時更新する適応制御手法が効果的であると解釈される。この手法による定常速度偏差は約 1rad/s であった。ただし、この速度偏差は速度信号をエンコーダからの角度情報を擬似微分により得ているためにセンサ外乱に敏感で、目標信号の仕様に応じた適切なローパスフィルタを導入することで改

善できる可能性がある。

以上より、モータ制御に関しても表 2.2.2.に示した仕様を十分満足することができる。

２．２．４　水圧システム及び制御の世界的研究動向

現段階では、水圧システム用アクチュエータ及びサーボ弁等のキーデバイスを設計・製造できるメーカは世界的に見てもあまり多くないのが現状であり、近年選択肢は確実に増えつつあるが、油圧向けのものと比較すると製品ラインナップは充実しているとは言えない。この現状に対してデンマーク工科大では 2004 年からベーンタイプの揺動モータを独自開発し、これを 2 リンク型マニピュレータに応用する研究を進めている[16]。更にサーボ弁に関しては、ノズル・フラッパ構造の代わりにステッピングモータとボールねじを組合せた機構によりスプールを直接制御する弁構造も提案されており、現在性能試験が行われている[17]。近年のステッピングモータの応答性は数 ms オーダと非常に高いため、このような電気-機械系の組合せ機構によるスプール制御の応答性にも期待できる。ただし現状のサーボ弁と同様、ゼロ点付近での漏れ流量を抑制するためにスプールランドとスリーブに正重合構造を取らざるを得ず、中立点付近での不感帯の影響が大きいことも明らかにされており、今後改善が待たれる。この他にはオーバライド特性を大幅に改善したリリーフ弁に関する成果も報告されている[18]。

またサーボ弁を利用しない制御としては、タンペレ工科大が中心に進めている On-Off 弁を利用する手法が挙げられる。この方法では異なる有効断面積を有する複数の切換え弁を流路に並列に配置し、事前に取得した個々の流量特性に応じて必要流量を切換えることでアクチュエータの制御を実現するものである[19]。サーボ弁に比べて圧倒的なコスト低減とコンタミへのロバスト化が図られ、制御特性もサーボ弁に近い精度が得られている一方、使用する On-Off 弁の数の増加によりどの弁を開閉するかについての計算量が膨大に増えること（2 のベキ乗個の組合せ）、切換え時の機械的ショック及び騒音が大きいことがデメリットとして挙げられる。この方法は ITER の核融合炉における燃料カートリッジ交換ユニットの制御に採用される予定である。

なお中国では、現時点では水圧システム解析あるいはアクチュエータ制御に関して未だ積極的な研究が行われていない。

２．２．５　実用化における課題

水圧アクチュエータが発電所内の適用にあたり制御仕様を十分に達成できる可能性が高いことが従来の研究成果からも明らかとなったが、実際の運用にあたっては留意が必要な点がある。以下ではこの点について述べる。

（１）水質管理

サーボ弁の動作を確実に保証するために、水質管理は特に重要である。特に 10μm オーダのメッシュによるフィルタや作動流体中の細菌に関しては十分な管理を行う必要がある。

（２）温度管理

油圧に比して水道水の温度変化による物性変化は非常に小さいが、アクチュエータ各部のシール材等への影響及び寿命を考慮するため、温度管理も重要である。

（３）サージ圧対策

等価体積弾性係数が油圧に比べて 1.5 倍程度になる水道水は、高い応答性が期待できる一方で、弁の急閉鎖時当に発生する圧力上昇（サージ圧）が大きいことも知られており、場合によっては機器を破損する可能性が指摘されている。サージホースの利用等、実用を鑑みた場合何らかの対策が必要である。

２．２．６　まとめ

サーボ弁を用いた ADS ロボティクス制御は、二次側エネルギーの利用として発電所内及び一般産業用機械への適用にあたり制御仕様を十分に達成できると判断される。本章では特に、負荷変動やモデル化誤差を事前に制御器設計に反映できるロバスト制御理論の適用が効果的であることを示し、発電所内での利用を含む一般産業用機械の制御を行う観点からこれまでに報告された結果を中心にまとめた。更に、本調査研究で構築する基本モデルを用いて ADS ロボティクスシステム制御を実現することにより、ADS ロボティクスシステムの一次エネルギー発生システムへの応用性を確認することができるものと考える。特に一般産業用機械では回転運動を必要とする制御ニーズが多いものの、先述したように水圧モータ制御に対して十分な研究・応用結果が得られているとは言い難い。その意味でも今後は ADS ロボティクスが十分なポテンシャルを有することを示す必要がある。

参考文献

[1] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP 資料
http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/foreigninfo/html0010/pdf/p128-p130.pdf

[2] 眞田, 水圧駆動樹脂封止プレスのロバスト荷重制御器の設計手法に関する研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.34, No.3, pp.18-24, 2003

[3] K.Sanada, A method of designing a robust force controller of a water-hydraulic servo system, Proc. of IMech.E. Vol.216, Part I, pp.135-141, 2002

[4] 高橋ら, 水圧サーボモータシステムのロバスト制御に関する性能評価（第 1 報 H∞制御手法による制御系設計), 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.38, No.2, pp.13-20, 2007

[5] 横田ら, 油圧ショベルのアーム系 3 軸のロバスト軌跡制御(外乱オブザーバによる制御の有効性の検討), 日本機械学会論文集(C 編), Vol.66, No.648, pp.2549-2556, 2000

[6] 横田ら, 配電工事用電気油圧マニピュレータの高精度ロバスト制御(第 2 報, 外乱オブザーバを用いた 2 軸アーム高精度軌跡追従), 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.25, No.6, pp.746-752, 1994

[7] 伊藤ら, 水圧サーボモータシステムのロバスト制御に関する性能評価（第 2 報 外乱オブザーバ及びスライディングモード制御手法による制御系設計), 日本フルードパワーシステム学会論文集, 38-2, pp.21-28, 2007

[8] 伊藤ら, 水圧サーボモータシステムのロバスト制御に関する性能評価（第 3 報 適応制御手法による制御系設計及びこれまでの制御性能の比較), 日本フルードパワーシステム学会論文集, 38-3, No.3, pp.35-40, 2007

[9] マチエヨフスキー著, 足立訳, モデル予測制御―制約の下での最適制御―, 東京電機

大学出版局, 2005
[10] 宮川, 誰にでも解るアクアドライブシステム（ADS）入門⑧-新・水圧技術-, 油空圧技術, 2006. 9
[11] 眞田ら, 樹脂封止プレス用水圧駆動システムのシミュレーションに関する研究, 油空圧学会論文集, Vol.33, No.4, pp.17-23, 2002
[12] 眞田ら, 水圧駆動樹脂封止プレスの速度及び荷重制御に関する研究, Vol.32, No.7, pp.16-22, 2001
[13] NEDO 新規産業創造型提案公募事業, 新駆動システムとしての水圧制御技術の研究開発, 研究成果報告書 99S29-007, 1999
[14] 望月ら, 水圧アキシァルピストンモータのサーボ制御, エバラ技報, No.184, 1999-7
[15] D.Terasaka *et al.*, PID-Control of Water Hydraulic Symposium on Fluid Power, Proceedings of the 5th JFPS International Symposium on Fluid Power, Vol.1, pp.143-148, 2002, Nara, Japan
[16] F.Conrad *et al.*, Development of a novel water hydraulic vane actuator applied for a control of a two-link test manipulator, Proceedings of Power Transmission and Motion Control 2005, pp.117-129, BATH, U.K., 2005
[17] 稲山, 大道ら, 直動型水圧サーボ弁の開発, ロボメック 2008 予稿集, 2008
[18] K.Suzuki *et al.*, Development of a direct pressure-sensing water hydraulic relief valve, Int. J. Fluid Power, Vol.9, No.2, pp.5-13, 2008-8
[19] M.Linjama *et al.*, Comparison of Digital Hydraulic and Transitional Servo System in Demanding Water Hydraulic Tracking Control, Proceedings of Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control FPMC 08, pp.393-403, Bath, U.K., 2008

第３章　環境、省エネルギー技術の視点に立ったADS応用の展望

ADS技術は作動流体に「清水」を用いたエネルギー伝達技術である。これまで本技術の特長から防爆・安全はもとより、衛生・クリーンそして「水の有効利用」の視点から省資源などのコンセプトの基に研究開発と市場への導入を図ってきた。ADSの特長については３．５．１節に述べる。今までものづくりの製造プロセスにおいては、生産の効率化を目標に省エネルギー化を追求してきた。

いわゆる「低炭素化社会の構築」が解決すべき重要課題となった1973年のオイルショック以来、地球環境の視点から化石燃料の多用による温暖化防止をいかにして最小化すべきか、日本の「省エネルギー」技術は世界のトップレベルにまで磨かれた。当初は生産工程の合理化、機器や装置の効率向上などのグロスの省エネルギー化が主体であった。その後、更に発展し、排熱回収することにより、ネットの消費エネルギーの削減に向けられた。今回の調査結果によれば、排熱量の多い業種は電力、化学、鉄鋼、清掃、窯業、紙パルプ、石油の順である。排熱回収発電は1980年代からこれらの業種で始まり、その後、廃プラなど利用して更に付加価値の向上や環境対策が発展してきた。

さて、これまでの油圧、空気圧が主体であったフルードパワー技術の省エネルギー技術においても機器やシステムの効率向上に努力がなされ、同様に発展した。本提案のADSとしてのフルードパワー技術は「水を作動流体」とする上述した従来にない特徴を生かした応用の可能性とその検証である。省エネルギーとしての技術は、広くは家電を含め、一般産業における基本技術であることは論を待たない。ADS自体においても機器や装置の省エネルギー運転についてこれまで検討され、一部実証されつつある。しかし、ADSの技術的本質性である「水」を作動流体に用いていることから電動、油圧、空圧など他の駆動源には見ない特長を生かせることができれば、従来にない新たな付加価値を有する産業技術として社会への貢献が期待できる。そのような視点に立って、コージェネとの融合を基本として、産業領域から発生する排熱の更なる有効利用の可能性を知るために、排熱の発生が多いといわれる業種から排熱される熱の質とその利用などの資料を収集して、ADS技術導入の可能性に言及する。

３．１　熱の利用形態

ここでは熱エネルギーの利用形態を「コージェネレーション」の視点から調べてみた。

図3.1.1は熱の温度、熱媒体、熱の変換形態そしてその利用形態を示している。1500から700℃まではエンジン、ガスタービンが発電に、蒸気タービンは発電と動力に利用されている。300から50℃までは工場やビルでの熱利用や給湯、暖房などに利用されている。この様な熱を利用形態から以下に示す二つのグループに単純化してみた。

(1) 熱の水平利用：熱の質（温度など）が**同じレベル**での応用
　例えば：ホテル、旅館などの浴場、銭湯、プール・サウナ、工場、コンビニ、
　　飲食店、住居、病院など。

(2) 熱の多段利用：熱の質（温度など）が**異なるレベル**での応用
　例えば：電力、動力、産業用加熱、冷暖房など。

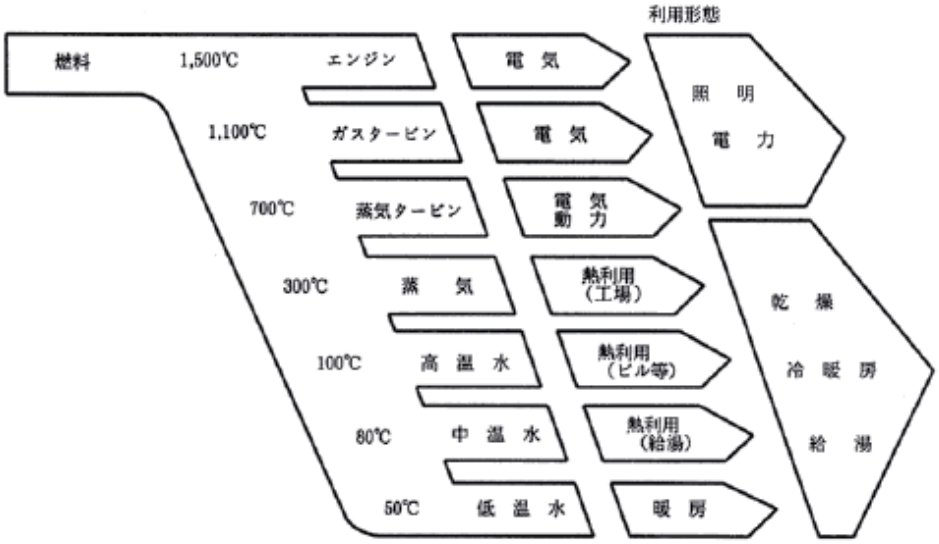


図 3.1.1　熱エネルギーの利用形態

（出展：コージェネレーション総合マニュアル，日本コージェネレーションセンター）

３．２　工場排熱の調査

熱の発生形態を排熱の視点から業種別に調査した。

全国排熱量の値を業種別に推定している。全国排熱量は約 27 万 Tcal/y となっており、購入エネルギーに対する排熱の割合は 9.6%である。排熱の多い第一グループは電力、化学、鉄鋼で各 4-6 万 Tcal/y である。第二グループは清掃、石油、窯業、紙パ各 1-2 万 Tcal/y である。表 3.2.1 に全国排熱量の総括を示す。

表 3.2.1　業種別全国排熱量の総括表

業種	アンケート値	全国値	全国値	備考
	排熱量	購入エネルギー量	排熱量	
	Tcal/y	Tcal/y	Tcal/y	
1.食料	836	52485	5603	
2.繊維	277	16151	2497	
3.紙パ	3568	130906	14159	
4.化学	9002	572612	62531	
5.石油	9436		15219	注1）
6.窯業	2113	114145	15410	
7.鉄鋼	19436	782171	44214	
8.非鉄	1739	19869	4232	
9.機械	195	24392	4558	
10.電気	341	21802	3791	
11.輸送	748	26696	5168	
12.ガス	213	24400	2899	
13.電力	14604	1030245	67231	
14.清掃	5114		23320	注2）
15.他	102	7844	1066	
合計	67724	2823716	271898	

出典；財団法人省エネルギーセンター，工場群の排熱実態調査要約集

注 1)石油精製製品量比から計算　注 2）焼却量比から計算

以下に排熱の多い電力、鉄鋼、清掃についてもう少し踏み込んで調査した。

（１）電力（発電設備）

最新火力発電所であるガス、汽力のコンバイン方式は冒頭で記述している様にガスの高温域での熱エネルギーの利用や排熱の有効利用が進んでいる。発電効率は最大 59%で極めて高い効率である。このような発電所は今後次第に増加していくものと予想される。しかし、現在、火力発電には汽力式、タービン式、内燃式、複合式があるが、現状では汽力式が主たる発電方式である。電気事業便覧（平成 20 年版/日本電気協会）によれば、汽力式については一般電気事業者 10 社で、その内訳は汽力式が発電出力にして 95%を超える。日本全国でその数は汽力式が 10 社合計 83 個所、うち東京が 15 個所、関西、九州地区が 11 個所、中部が 10 個所、中国が 9 個所である。

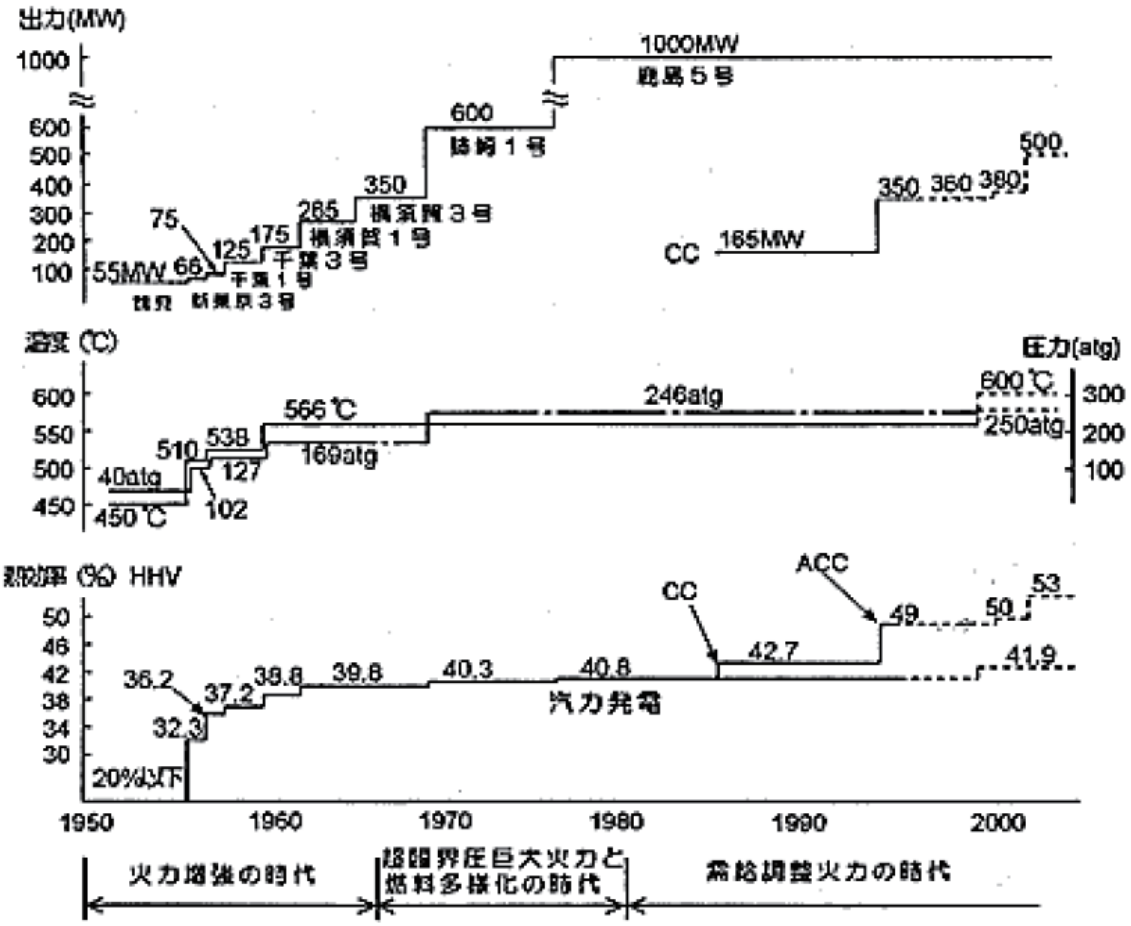


図 3.2.1　事業用火力発電所のユニット出力，熱効率の推移

出典；宮本忠，コンバインドサイクル発電の現状と動向，エネルギー資源，Vol.18,No1,(1997),pp.41.46

図 3.2.1 は汽力発電、CC（コンバインドサイクル発電)、ACC（改良型コンバインド発電）に関して、出力、温度、熱効率の時代の経緯と共に向上している様子を示している。なお、冒頭に述べている東京電力㈱川崎火力発電では MACC 発電（1500℃級コンバインドサイクル発電）が平成 20 年 6 月運転を開始している。汽力方式は暫時 MACC 化なると思われる。

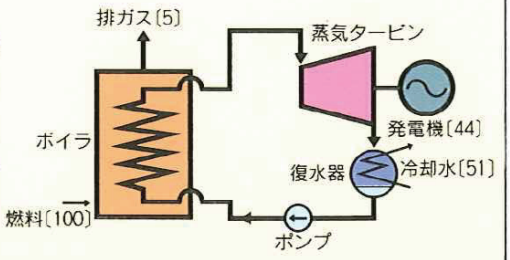
参考までに各発電プラントを模式的に図 3.2.2 の（ａ）から（ｃ）に示す（東京電力 MACC カタログ)。

MACC 発電の最大開発改良ポイントは、ガスタービンの入り口ガス温度を 1500℃に高温化することにより、更に高効率・大容量化している。このシステムでは排ガス温度が 610℃であり、これを排熱回収ボイラー低温再熱蒸気、高圧蒸気（13MPa、560℃)、高温再熱蒸気(570℃、3MPa)、低圧蒸気(270℃、0.4MPa)の排熱を回収して蒸気タービンに戻し、排熱を有効に利用している。またこのシステムでは高温蒸気を 2%地域産業

に配管で搬送し、熱源として利用している。模式図中投入燃料、発電機、排ガスなどに付随してカッコ内に数値が記述されているのでエネルギー配分が理解できる。火力発電の現状は、上述したように汽力発電方式が多いようである。

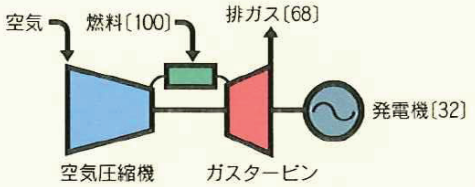
[汽力発電]

ボイラ内で燃料を燃やして蒸気を発生させます。この蒸気の膨張力により蒸気タービンを回転し、直結した発電機を回します。比較的低温域での（600℃以下）熱エネルギーの利用に適しています。

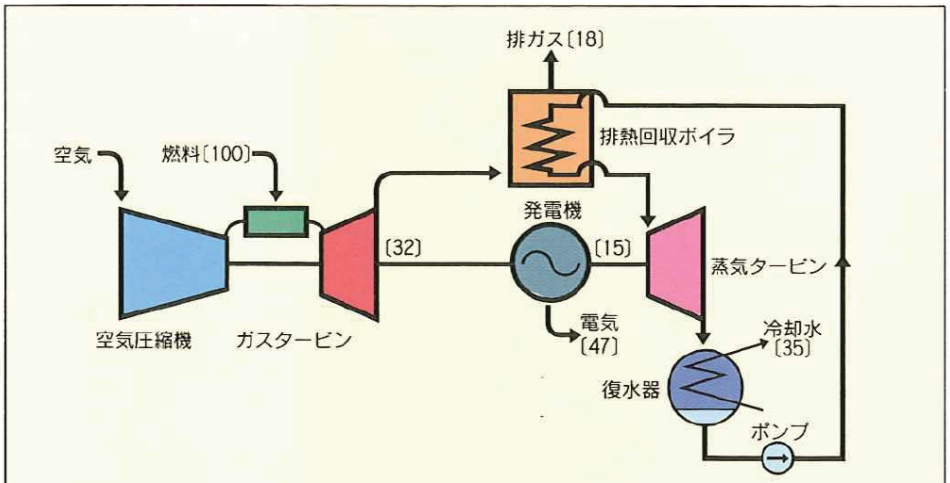


[ガスタービン発電]

圧縮した空気の中で燃料を燃やして高温高圧の燃焼ガスを発生させます。このガスの膨張力によりガスタービンを回転し、直結した発電機を回します。比較的高温域での熱エネルギーの利用に適しています。



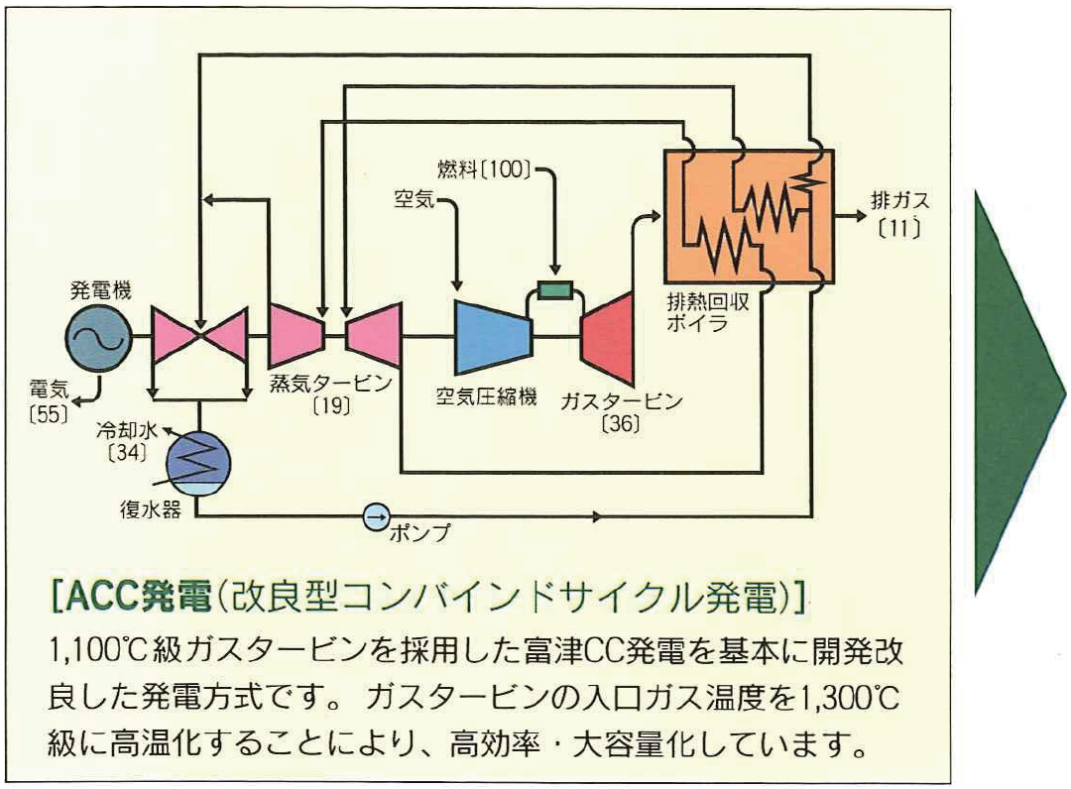
（a）



[CC発電（コンバインドサイクル発電）]

汽力発電とガスタービン発電の長所を組み合わせた発電方式で、ガスタービンで仕事をし、550℃程度まで温度の下がったガスタービンの排ガスをボイラに導き、蒸気を発生させます。熱エネルギーの高温域はガスタービンで、低温域は蒸気タービンで利用します。

（b）



（ｃ）

図 3.2.2　火力発電の発電方式模式図

（２）鉄鋼

鉄鋼関連は業界上げて「エネルギーセキュアリティー」、「国際競争力」、「地球環境問題」そしてそのための「技術革新」をキーワードに「省エネルギー」を長年検討し、進歩を遂げてきた。中でも地球環境問題は非常に重要なテーマとなっている。日本の製造技術は世界最高水準のエネルギー効率を誇っている。1973 年のオイルショック以来その努力は今や世界で最も優れた「省エネルギー技術」に成長した。世界が要求するレベルは、日本はこれまで乾いた雑巾を絞るだけ絞ってきたが、更なる絞りを要求されている。鉄鋼業界では 1973 年以来、2010 年までの省エネルギーの取り組みを公開している。

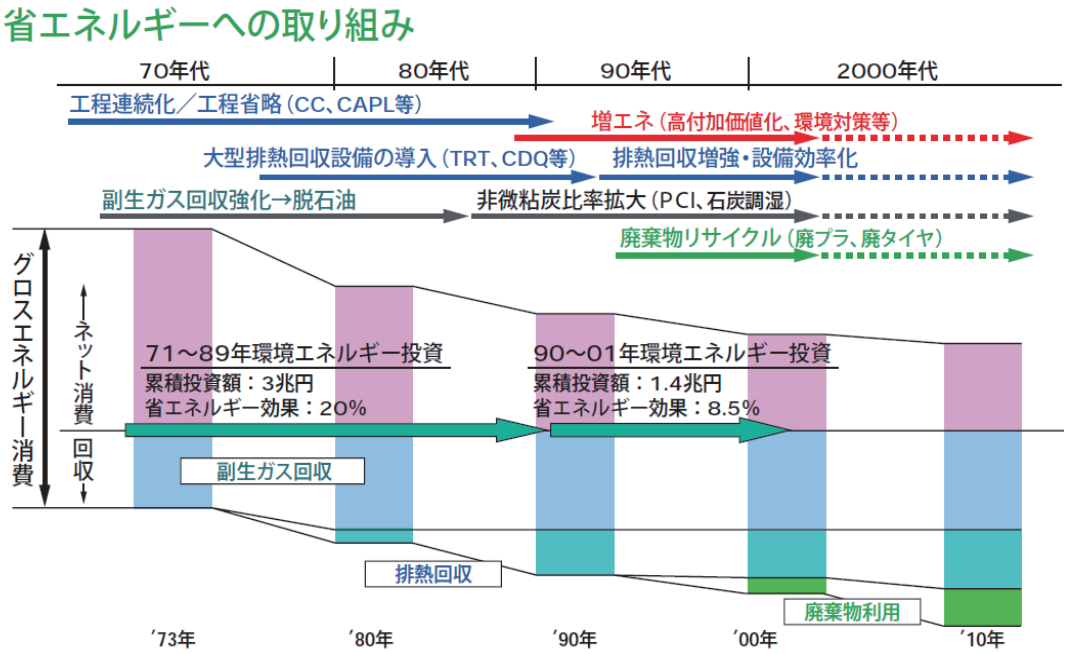


図 3.2.3　省エネルギーへの取り組み

出典；NIPPON STEEL MONTHLY 2004.4，2030 年のエネルギービジョン

初期の省エネルギー対策は、当初は生産効率の合理化・連続化によるグロスの省エネルギーであった。その後、更に排熱を回収することによるネットの熱消費量を削減する方向に進んだ。最近に至っては廃棄物の利用による省エネルギーと同時に廃棄プラスティックス、使用済みタイヤを利用する循環型社会への貢献に取り組んでいる（図 3.2.3 参照）。鉄鋼生産プロセスではコークス炉、高炉、転炉などのサブプラントから発生する副生ガスを排熱設備へ導入し排熱発電を行い、エネルギー効率向上を強化している。今後、次世代製鉄技術の一環として二酸化炭素の分離・回収、鉄鉱石の水素還元の技術開発が検討されている。いずれのプロセスでも副生物・排熱の回収は付いて回る性格のものである。

（３）清掃工場

ここでは一例として「都市更新期を捉えた未利用エネルギーの活用」として豊島清掃工場で排熱利用について調査した。今後、従来のごみ焼却場において排熱利用が展望可能と考える。清掃工場で発生する排熱利用と 700 メートル離れた地域冷暖房との連動である。ここで発生する排熱の利用予測がなされている（図 3.2.4 参照）。

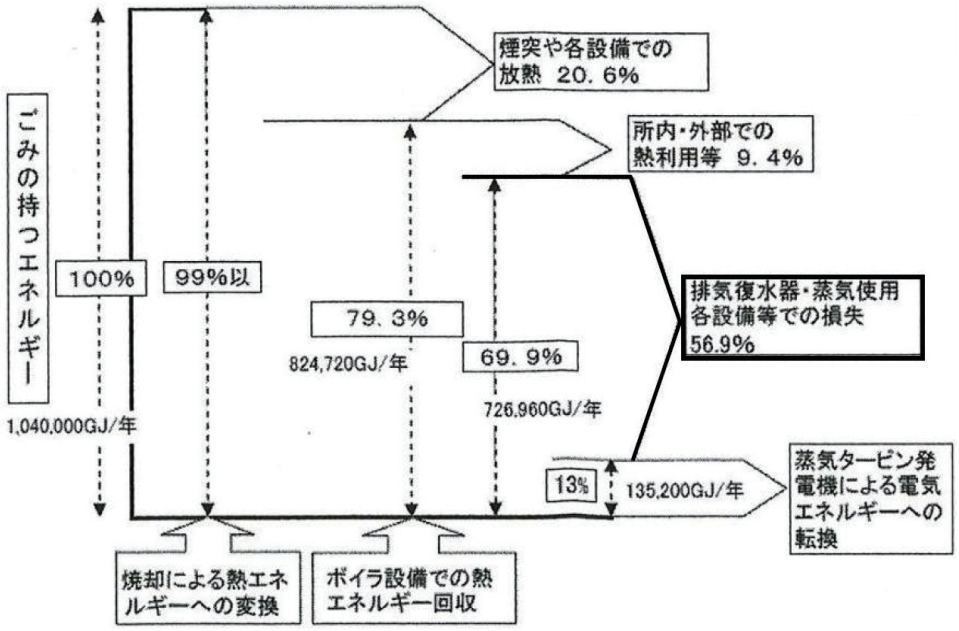


図 3.2.4　豊島清掃工場での排熱利用イメージ

出典；池袋副都心グランドビジョン 2008,清掃工場排熱利用システムの構築

ボイラー設備での熱エネルギーの回収が 79.3%、そのうち 13%が蒸気タービン発電機による電気エネルギーの変換に利用されている。9.4%は所内・外部での熱利用、56.9%は排気復水器・蒸気使用の設備などでの損失である。69.9%の排熱の質を調査する必要があるが、その利用は更に検討するに値する。

３．３　熱質の調査

排熱の中でも利用価値の高いとされる高温ガス部分（ガス温度：250℃、温水排熱 80℃以上、固体排熱 200℃以上）を高温排熱とし、これまで算出してきた調査排熱(ガス温度：100℃以上、温水排熱（蒸気を含む）：40℃以上、固体排熱：200℃以上)を有効排熱全体とした。高温排熱は有効排熱全体の 1 /5 の約 5.7 万 Tcal/y である。

表 3.3.1 中の「G250T」はガス温度 250℃以上のガス排熱量、「H080T」は温水温度 80℃以上の温水廃熱量、「S0200T」は固体温度（鉄鋼がほとんどで固体排熱の実態は 1000℃以上のコークス排熱及び一部フラッグ排熱）200℃以上の排熱量である。

表 3.3.1　高温排熱の排熱量

単位:Tcal/y

業種	高温排熱				有効排熱全体
	G250T	H080T	S0200T	高温排熱	
1.食料	489	879	0	1368	5603
2.繊維	1224	246	0	1470	2497
3.紙パ	377	710	14	1101	14159
4.化学	10504	1847	46	12397	62531
5.石油	4211	93	552	4856	15219
6.窯業	4502	5	0	4507	15410
7.鉄鋼	11142	357	5435	16934	44214
8.非鉄	2367	67	84	2518	4232
9.機械	1262	0	24	1286	4558
10.電気	442	142	0	584	3791
11.輸送	1971	47	537	2555	5168
12.ガス	519	176	0	694	2899
13.電力	144	261	0	405	67231
14.清掃	2841	3031	10	5882	23320
15.他	53	29	0	82	1066
計	42046	7890	6704	56639	271898

出典；財団法人省エネルギーセンター、工場群の排熱実態調査要約集

排熱蒸気の現実を電力関連の資料から調査すると以下の圧力と温度をエネルギー回収に用いていることがわかる。

① 高温蒸気（560℃－13MPa）
② 高温再熱蒸気（570℃－3MPa）
③ 低圧蒸気（270℃－0.4MPa）
④ 高～低温水（100－50℃）

以上の排熱による発電に関して、ADS の利用に対しては出力が極めて大きい。しかし、近年省エネルギーはものづくりの日本において、多くの産業に要求されるようになって来

た。図 3.3.1 に示す発電設備は出力が 7～132kw である。この様な設備は今後省エネルギーの視点から多くの産業分野において発電への利用だけでなく駆動源としても応用されるものと思われる。蒸気温度は 220℃、圧力は 0.2－0.95MPa である。蒸気温度としては低いレベルであるが、この様な仕様での発電に応用され始めている。

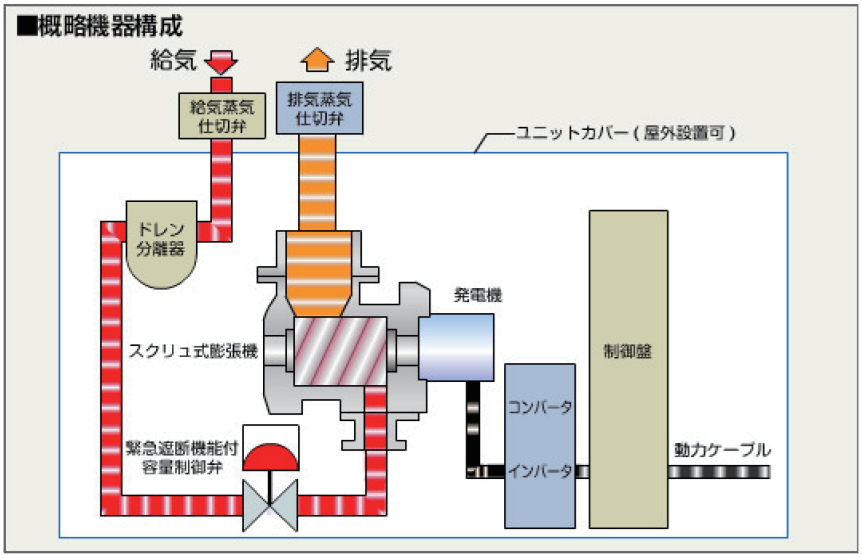


図 3.3.1　スチームスター概略機器構成
出典；神鋼商事株式会社 HP

３．４　蒸気の駆動源としての応用調査

蒸気タービンのその主たる目的は発電によるエネルギーの回収である。ADS の心臓部である水圧ポンプは圧力水を駆動する重要な機器である。ここではこのポンプの駆動源として蒸気タービンを考えている。蒸気タービンの発電以外の応用である駆動減として現状を調査してみた。

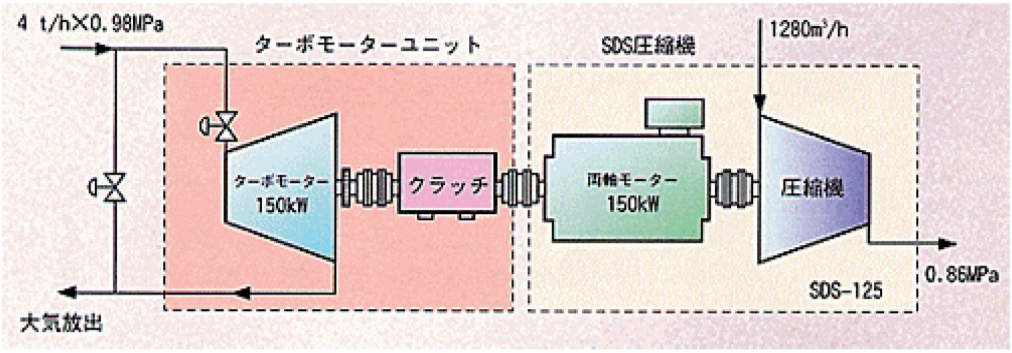


図 3.4.1　蒸気タービン駆動 SDS 圧縮機
出典；株式会社日立産機システム HP

図 3.4.1 はこれまでは余剰蒸気を減圧弁で大気に放出していたが、高圧側と大気側の圧力差を利用して圧縮機を駆動している。

図 3.4.2 に冷凍機用コンプレッサー、図 3.4.3 に工場用コンプレッサー、図 3.4.4 に給水ポンプに蒸気タービンを駆動源として応用した例を示す。

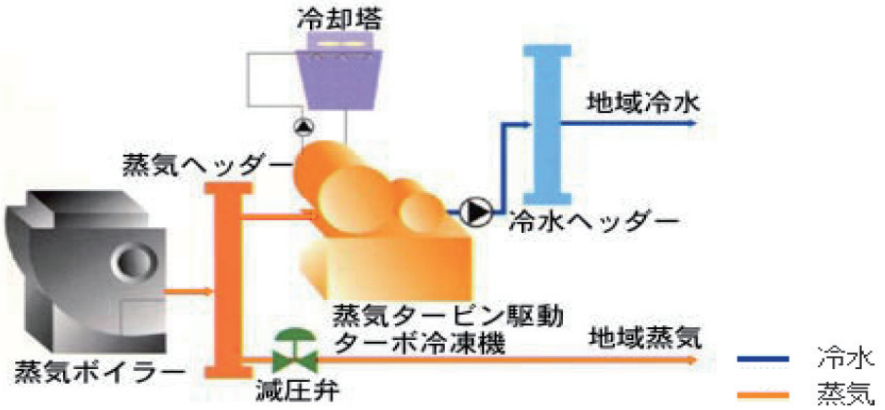


図 3.4.2　蒸気タービンの応用例（ターボ冷凍機）
参考文献；(社) 日本熱供給事業会ホームページ

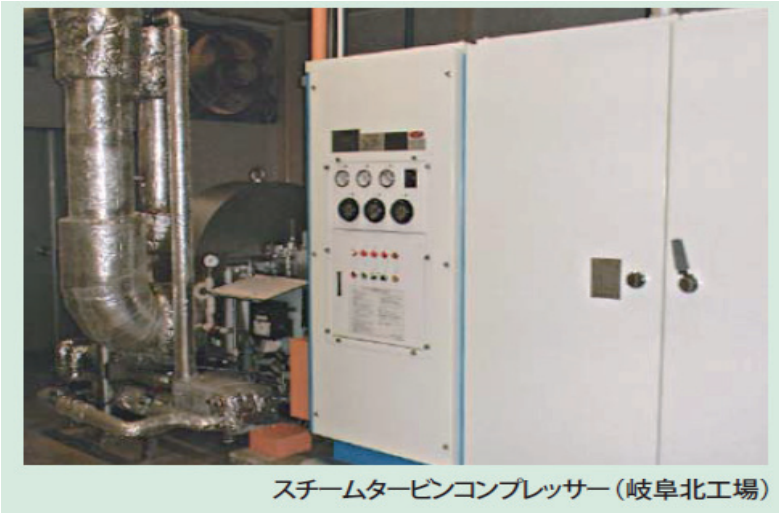


図 3.4.3　蒸気タービンの応用例（コンプレッサー）
参考文献；カヤバ工業㈱環境リポート 2002

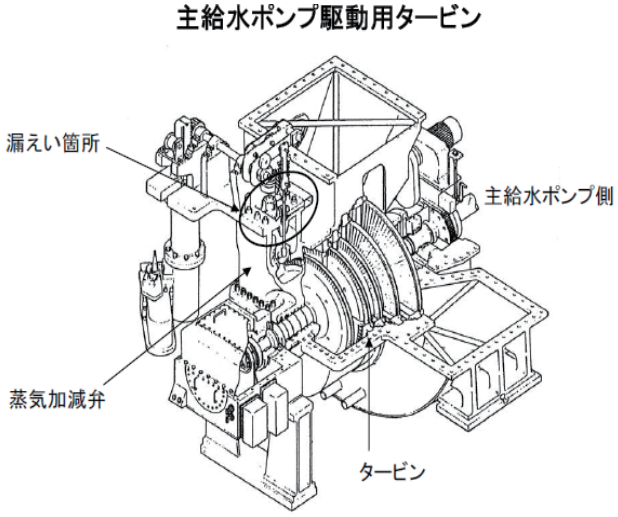


図 3.4.4　蒸気タービンの応用例（原子力発電用主給水ポンプ）
参考文献；（独）日本原子力研究開発紀行敦賀本部ホームページ
「もんじゅ」の安全確保に向けて事故・トラブル等の事例とその対応

参考文献・資料

分　　類	タイトル	出　　典
排熱の質	工場群廃熱実態調査研究要約集 第４章　工場廃熱の特徴	（財）省エネルギーセンター ホームページ
排熱の質	MACC コンバインドサイクル発電	東京電力㈱　MACC 解説資料
排熱の質	コージェネレーションシステム(仕組みと使用する潤滑油)	㈱潤滑通信社ホームページ
排熱の質	PFI による”ごみ発電の事業化” －日本型 PFI により先進的発電を－	三菱重工技報 Vol.39 No.5 2002-9
排熱の質	LP ガスによる省エネシステム	日本 LP ガス団体協議会ホームページ、 LP ガス読本第５章
排熱の質	発電技術の最近の動向	大阪大学大学院工学研究科　高橋敏美
排熱の質	エネルギー動向 第２章 省エネルギー動向	資源エネルギー庁 エネルギー白書 2006 年度版
排熱の質	原子力発電所における温排水データに関する調査状況　関西電力㈱ 資料 4-3	福井県原子力安全専門委員会　第 33 回 平成 18 年 12 月 22 日　資料
排熱の質	東京都における人工排熱に関する調査研究－清掃工場及び事業所排熱特性の推定と検討－	日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）2003 年 9 月
水平、多段利用	伊豆の国市・伊豆市広域一般廃棄物処理施設基本構想　第 7 章 余熱利用技術	伊豆の国市公式ホームページ
水平、多段利用	北九州エココンビナート構想と実現	北九州市立大学国際環境工学部 事例研究 19 チーム 北九州エコ・コンビナートの基本構想と実現～排熱の利用と再生～
水平、多段利用	日本の製造業における排熱利用可能性の評価	学術振興会未来開拓技術研究推進事業 「アジア地域環境保全」Work Group2
水平、多段利用	コージェネレーション技術	財エネルギー総合研究所　公開資料
水平、多段利用	地域エネルギー論 ２－５熱のカスケード利用	北九州市立大学　国際環境工学部環境空間デザイン学科地域エネルギー・高偉俊研究室
水平、多段利用	サーマルリサイクルを利用した高効率ハイブリッド冷却システム サッポロビール㈱静岡工場エンジニアリング部	(財)省エネルギーセンター　H15 年度 省エネルギー優秀事例全国大会
排熱発生源	発電設備	日本電気協会、平成 20 年版電気事業便覧
排熱発生源	2030 年エネルギービジョン　新日本製鉄㈱	総合資源エネルギー調査会（経済産業省諮問機関）　2004 年 1 月 22 日発表
排熱発生源	蒸気タービン発電システム	神鋼電機㈱カタログ
排熱発生源	「原子力のすべて」－地球と共存する知恵－	「原子力のすべて」編集委員会　編

分　　類	タイトル	出　　典
排熱発生源	最新鋭石炭炊き 600MW 発電プラント”東京電力㈱広野火力発電所５号機”の営業運転開始	三菱重工技報 Vol.41 No.5 2004-9
排熱発生源	蒸気タービンプラントの基本概念図	教習船実習生用教科書参考資料
排熱発生源	蒸気タービン発電システム	三菱重工㈱英語版ホームページ
排熱発生源	蒸気タービン	JFE エンジニアリング㈱カタログ
排熱発生源	清掃工場排熱利用システムの構築	池袋副都心グランドビジョン 2008
排熱発生源	調整運転中の柏崎刈羽原子力発電所２号機におけるタービン制御系の油漏えいに関する調査結果添付資料	東京電力㈱プレスリリース
排熱発生源	東京電力㈱福島第一原子力発電所５号機　運転上の制限の逸脱について（第２報）	経済産業省　New Release H20.6.4
排熱発生源	タービン蒸気便駆動用油配管フランジ部からの油漏洩	（独）原子力安全基盤機構（JNES）ホームページ　2000 年度トラブル情報
排熱発生源	H15 年度伊方発電所の異常通報連絡事象について 資料４－２	四国電力㈱　平成 16 年６月公開資料
排熱発生源	3 号機タービン駆動給水ポンプまわりの便の監視について	中部電力㈱平成 16 年 10 月 27 日公開資料
排熱発生源	５号機湿分分離加熱器（B)第 2 段加熱蒸気副流量調整弁不調に伴う点検結果について	中部電力㈱平成 18 年 2 月 1 日公開資料
排熱発生源	発電プラント停止中の運用改善による蒸気使用量削減　中部電力㈱知多火力発電所発電課３E グループ	(財)省エネルギーセンター　H17 年度省エネルギー優秀事例全国大会 省エネルギー実施事例
排熱発生源	マイクロガスタービン・分散エネルギシステム	東大大学院工学系研究科　笠木　伸英
排熱発生源	加硫型流動床ガス化炉の選定・システム基本設計	(独）NEDO　新エネルギ海外情報 00-10 号　P.128-130
駆動	蒸気タービンコンプレッサ	KYB 環境リポート 2002
駆動	蒸気タービン冷凍機	社団法人　日本熱供給事業会
駆動	蒸気タービン駆動 SDS 圧縮機	日立産機システム㈱カタログ
駆動	原子炉トラブル事例 件名：蒸気漏れ（タービン駆動式主給水ポンプ）	(独)日本原子力研究開発機構敦賀本部ホームページ 「もんじゅ」の安全確保に向けて事故・トラブル等の事例とその対応集
駆動	流体継手	TRANSFLUID 社カタログ
駆動	FM 形流体継手	㈱日立ニコトランスミッション カタログ
応用	スクリュ式小型蒸気発電機	神鋼商事㈱ホームページ

分　　類	タイトル	出　　典
応用	オイルフリーターボコンプレッサ	㈱IHI　カタログ
応用	住友軽金属工業㈱名古屋製造所における継続的省エネ ESCO 事業 ㈱ファーストエスコ	（財）省エネルギーセンター ホームページ　工場の詳細事例
応用	省エネモデル事業初の現地追及形プラントが完成 ～広西チワン族自治区（中国）にてセメント排熱回収発電設備竣工式を開催～	NEDO 技術開発機構「省エネモデル事業」　平成 16 年 12 月 10 日公開資料
応用	鉄鋼業における地球環境・エネルギー問題への取り組みについて 新日本製鐵㈱代表取締役社長 三村明夫	新日本製鐵㈱ 平成 20 年 3 月 13 日公開資料
応用	鉄鋼業の省エネルギー 新日本製鐵㈱　平尾隆	新日本製鐵㈱　平成 16 年 2 月 2 日公開資料
応用	加古川製鉄所の省エネルギの取組み	KOBE STEEL ENGINEERING REPORT/Vol.53 No.2
応用	低温廃熱回収発電装置の実用化開発	地球環境保全関係産業技術開発促進事業 京都議定書目標達成産業技術開発促進業 技術開発促進事業終了報告書 平成 15 年度～平成１７年度
応用	第 1 回 LCA 日本フォーラム　鉄鋼業への LCA 適用と今後の展開　新日本製鐵㈱　高松信彦・米沢公敏	新日本製鐵㈱　公開資料
応用	製鉄所における環境への取り組み	JFE 技報　No.6　（2004 年 12 月）p.5-12
応用	環境調和型製鐵プロセス技術開発	NEDO 技術開発機構プロジェクト 日本鉄鋼連盟 COURSE50 委員会 2008 年 7 月 30 日公開
その他	マイクロ水車	かんでんエンジニアリング ホームページ
その他	基礎講座 マイクロ水力発電の現状と新技術	建設電気技術　Vol.152 2006.1
その他	マイクロ水力発電	㈱環境エネルギー研究所ホームページ
その他	海外諸国の電気事業	（社）海外電力調査会　公開資料
その他	長沼当地域新エネルギービジョン 第４章　新エネルギーの賦存状況と導入の可能性	北海道長沼町総務政策課 製作・行革・情報係
その他	バルブ	特許庁標準技術集

３．５　新・水圧技術（ADS:Aqua-Drive-System）の特徴について

３．５．１　ＡＤＳの新規性・独自性

（１）機器に合う作動液ではなく水に合う機器という逆転の発想

ａ）水圧技術の始まり

加圧された水を用いて動力を伝達するという工学的な意味のある駆動システムが初めて使われたのは、英国の発明家 Joseph Bramah が、パスカルの原理に基づく水圧駆動プレス装置を開発し、特許を得た 1795 年からといえる。

その後､彼が生存した 19 世紀には英国を中心に水圧駆動システムが幅広く使われるようになった。当時、London Hydraulic Power Company はポンピングステーションをロンドンやその近郊都市の数箇所に建設し、密集した工業団地や商業地域に水道とは別配管によって現在の電力配電網のごとく加圧水を供給した。これを利用して多数のクレーン、跳ね橋、ホイスト、プレス、ウィンチ、エレベータ等が加圧水で駆動されていた。

大動力を手軽にかつ容易に制御できるエンジンや電動機は、大規模な電力配電網のない 19 世紀には存在せず、このような水圧駆動システムは貴重な駆動システムであったことが想像できる。例えばロンドンのタワーブリッジの跳ね橋は水圧駆動であった、パリのエッフェル塔のエレベータは今も水圧駆動である。しかし、当時のポンピングステーションの供給圧力は 7[MPa]あるいはそれ以下しかなく､更に使用現場では 3～5[MPa]まで低下するのが常であった｡当時の水圧駆動技術は､下記の様々な問題を含んでいた。

・水の低粘性による内部・外部漏れ
・水の低潤滑特性による摩擦と磨耗の発生
・水の機器の材料に対する腐食性と発錆性
・水のキャビテーションの発生、凍結

ｂ）油圧化による流体制御の発展

このような問題を一掃できるシステムとして 20 世紀に登場したのが油圧駆動システムであり、1906 年米国の戦艦 Virginia 号の艦砲システムの駆動と制御に油圧が用いられたときから近代的な油圧駆動技術の歴史が始まった。作動流体として水の代わりに石油系の作動油を使うことによってそれまでの水圧駆動システムがもっていた様々な問題が大幅に改善され、それに伴って小型軽量化、高制御・高応答化、高圧化、高効率化などが著しく進んだ。現在では航空機、自動車、建設機械、加工機械などの分野で欠くことのできない重要な駆動システムとして広く使用されている。

油圧駆動システムには主に鉱物性作動油が使われており防錆、潤滑効果に優れているが、**火災の危険性**があり、その対策として、高含水作動液、水―グリコール等の水を含んだ難燃性作動液の使用が 1940 年代から始まった。これらの難燃性作動油には、増粘性、防錆剤、摩耗防止剤などの添加剤が多く含まれている。その添加剤は、バクテリアの栄養源にもなっているが内容についてはメーカーは明らかにしていない。これらの添加剤はしばしば機器やシール等に損傷を与えることがわかっているが、防火対策を第一優先する鉄鋼業等は使用上の管理を徹底するなどして使用している。

ｃ）水道水を使うという逆転の発想

1978 年横浜国立大学の山口教授[1]はそれまでとは全く逆の発想をもとに、作動液と

しての水道水の利用の可能性を最初に検討した。すなわち、「作動液として水道圧を用いる」という命題をまず立て、その実現可能性について、物性、潤滑、キャビテーションなど様々な面から検討を加えたのである。その結果、最も重要な課題は機器に使用できる材料ならびに流体潤滑の実現にあり、これらを克服すれば駆動システムとして十分大きな可能性があることを明らかにした。これは水道水を作動液として用いることを前提とし、それに合う制御機器を製作するという考え方であり、それまでとは 180 度考え方の方向が違っている。しかしここで指摘された問題がある程度解決に向かい、また社会的要求に伴って新しい水圧駆動システムが出現するには多くの時間を要した。

d）新しい水圧駆動システム（ADS）

1990 年代に至って環境問題がますます重要になるにつれ、油圧駆動システムの火災、省資源に続く第 3 の問題点として、作動油の漏れに伴う**環境汚染**の問題がクローズアップされるようになった。この問題に最も敏感な北欧諸国ではフィンランドやデンマークを中心として、水道水を作動液とした水圧駆動システムへの関心が高まり、研究が活発に行われ、ポンプ、モータ、シリンダ、電磁弁などの開発が北欧で進んだ。日本でもいくつかの企業や大学などで開発研究が行われ、サーボ弁、比例弁などが開発された。新しい水圧駆動システムの開発が可能になったのは、次のことが大きい。

・材料の発達、加工技術の向上、潤滑の工夫

まず新しい水圧機器の中心的材料となるステンレス鋼や、電磁弁に適した性能のよい電磁ステンレス鋼も開発されている[2]。またキャビテーションは極力発生しないことが望ましいが、水の蒸気圧は表 3.5.1 の物性の概略値に示すように鉱物油に比べて非常に大きく、特に温度が高くなるとより大きくなるためキャビテーションが発生し易い。このためキャビテーションエロージョン防止のために必要となる硬い材料としてセラミックスが利用されている[3]。更にしゅう動部に適したプラスチックの開発も進められてきた[4]。

表 3.5.1 水道水と代表的鉱物油の物性概略値

	水道水	代表的鉱物油
密度 20℃（kg/m³）	1000	900
動粘度 20℃（m²/s）	1×10^{-6}	30×10^{-6}
体積弾性係数（MPa）	2200	1500
飽和蒸気圧 20℃（Pa）	2300	0.5
密度変化率（% / ℃）	0.04	0.08
粘度変化率（% / ℃）	2	4

次に、水道水を使用した場合に問題となるのは隙間からの内部漏れである。一般に隙間からの漏れ量Qは、隙間の大きさδ、動粘度νとすると、層流領域では、隙間の大きさの 3 乗に比例し、動粘度に反比例する。表 3.5.1 によれば水道水は代表的鉱物油に比べて動粘度が 1/30 程度であるから、水圧機器の場合隙間厚さを油圧機器の 1/3 程度にす

れば隙間からの漏れ量は油圧機器と同等のレベルになる計算である。加工技術の向上によって現在ではこのような精密加工は可能であるがコスト高に繋がることになる。また水の粘度が小さく潤滑性が低いことから、静圧軸受けのような方法を用いて摩擦や摩耗を防止する工夫も行われている[5]。

これまで述べたような目的・要求のもとに開発されつつある新しい水圧駆動システムは、昔の水圧技術とは異なることを明示するため、**アクアドライブシステム（Aqua Drive System：略 ADS）**と呼ぶ。

（２）新しい水圧駆動システム「ADS」の独自性

新しい水圧駆動システム「ADS」は、19 世紀に使われていた水圧技術とは全く別の目的と性格をもって開発されていることが前述の歴史からわかる。そして、その基本となる考えは、「水道水を作動液とする」ということであり、他の駆動システムにはない ADS の特質すなわち、独自性と新規性は全てそこから出ている。まず、どのような具体的 ADS でももっている特質のことを独自性ということにすると、それは下記のものである。

独自性　：　クリーン性、環境親和性

まずクリーン性は、その駆動システムが機械油をどの程度消費するかを考えればわかる。最も消費するのはもちろん、表 3.5.2 に示すように油圧駆動システムであり、機器内に保持する作動油のかなりの量が外部に漏れ出ているともいわれている。もともと機械工場や大型機械など比較的これに寛容な場面で用いられているため大問題にならないだけである。

表 3.5.2 駆動方式と油との関係

	油圧	電気	空気圧	**ADS**
作動流体	作動油	－	空気	水道水
潤滑作用	作動油	潤滑油	オイルミスト	水道水
油の漏出	多	微	微	なし

一方、電気駆動や空気圧駆動は作動油こそ使用していないが、機器の潤滑には若干の油を使用しており、全く無縁とは言えない。したがって、たとえ微量ではあっても例えば半導体製造工程での空気圧の使用は問題となる。この点、「ADS は油を全く使用しない」ので完全なオイルフリーである。油を全く使用しないため ADS は次のような２次的な特長をもつことになった。

・外部漏れによる環境汚染の問題がない
・資源としての鉱物油を消費しない
・戻り管のないシステムも可能（空気圧のように）
・放射能を帯びることがない（油は放射線により放射能を帯びる）

水道水はもともと空気と同様身の回りにあるもので環境親和性がよく、多くの場合そのまま捨てても汚染問題はないので、空気圧のように戻り管のないシステムもいざとな

れば可能である。工場が汚い（3K 問題）原因の一つが潤滑油などの機械油の飛散によると考えられるが、駆動システムを ADS にすればこの問題はなくなる。また燃える可能性は相手がナトリウムのような特殊なものでもない限りもともと無縁である。一方、水道水の密度や粘度などの物性値の温度による変化は、表 3.5.1 のように鉱物油に比べて少ないので温度変化による影響の少ないシステムが構築できるが、水道水は沸騰や氷結のため使用温度範囲が鉱物油に比べて狭いことに注意する必要がある。

（３）新しい水圧駆動システム「ADS」の新規性

「水道水を作動液とする」ということから導かれる他の駆動システムにはない ADS の特質のうち、水道水の様々な特性に起因するものを新規性ということにすると、以下に示すように種々ある。

ａ）高剛性・低圧損

表 3.5.1 からわかるように水道水は鉱物油に比べて密度は若干大きいものの体積弾性係数が 50%程大きいため、剛性の高いシステムつまり特性周波数の高いシステムの構築が可能である。また低粘度であるため管摩擦圧力損失が小さく、粘度の高い油を用いる油圧駆動システムの配管系に比べて細くあるいは長くすることが可能である。

すなわち、水圧源ユニットと駆動制御システムが遠く離れた長大なシステムも可能である。ただし、管路をあまり細くし過ぎると、同量の流量を送るための流速が大きくなるため流速変動に応じた大きな圧力変動すなわち「水撃」による大きな圧力上昇が発生する。水撃による圧力上昇は音速と流速変動の積に比例するが、高剛性なほど音速が大きいため大きな水撃が発生し、更に低圧損なほどこれが減衰せずにシステム全体に伝播するためこの点に注意する必要がある。この特質が重要になるのは制御性がよく小型軽量で高速応答が求められる中高圧 ADS（7MPa 以上）の領域が多く、従来の油圧駆動システムや電気駆動システムに代わる最適な駆動システムとなりうる。

ｂ）耐水性・清浄性

ADS の作動液は水道水であるから、ADS 機器はもともと水に濡れても問題を生じない。これに対し電気駆動システムは制御性のよさという点で極めて発達しており、その点だけを考えると ADS の出る幕はない。一方、電気駆動システムは極めて水に弱いという欠点があり、水に濡れるシステムや清浄を必要とする分野では電気駆動システムではなく、中低圧 ADS（7～0.7MPa）あるいは中高圧 ADS（7MPa 以上）が最適な駆動システムとなりうる。すなわち電気駆動システムに向かない若干特殊な分野に限られる。

ｃ）高効率・高剛性

一般に空気圧駆動システムは安価で手軽な駆動システムの実現を目指しているが、低剛性で応答性が低く更にエネルギー効率が低いという問題がある。例えば、大気圧 $P_0 = 0.1\,[\mathrm{MPa(abs)}]$の空気を圧縮して圧力 $P_s = 0.8\,[\mathrm{MPa(abs)}]$、体積 V の圧縮空気にするために要するエネルギー E_0 は、状態変化を等温変化とすると下記のように表される。

$$E_0 = P_s V \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right) = P_s V \ln\left(\frac{0.8}{0.1}\right) \approx 2P_s V$$

圧力 P_s の圧縮空気を通常の使い方をした場合、取り出せるエネルギー E は多くても

$E = P_s V$ 程度である。したがって、エネルギー効率は $E/E_0 \leq 1/2$ となり、単純計算によれば最大でも 0.5 程度である。

これに対し、ADS の効率をこれより大きくすることはシステムの工夫によって十分可能である。また低剛性の空気圧とはまったく異なり ADS は非常に高剛性である。したがって空気圧駆動システムより制御性がよくエネルギー効率の高い、すなわち維持コストの安い駆動システムが ADS によって実現できる。更に、空気圧駆動システムと同じ圧力レベルの低圧 ADS（0.8MPa(abs)以下）に使用する機器は空気圧機器に若干の手を加えればできるものもあるといわれており初期コストの問題も十分解決可能である。したがって、空気圧システムとは違う意味で低コストかつ高性能のシステムが ADS により実現可能といえる。

d）家庭内・耐水性

家庭内で簡単に利用できる駆動システムとしては、これまでは電気駆動システムの他には人力しかないと思われていた。電気駆動システムは水に濡れる場合は安全とはいえないのでこのような場合は人力に頼らざるを得なかった。しかし、電力と同様、各家庭に必ず供給されているものとして水道圧エネルギーがある。このエネルギーは水道圧 ADS により容易に機械運動エネルギーに転換できるもので、水場での使用に問題がなく、また電気が途絶した場合にも利用することができる。

表 3.5.3 対象によって変わる ADS の様々な新規性

ADS の新規性	対象
高剛性・低圧損	油圧駆動システム
耐水性・清浄性	電気駆動システム
高効率・高剛性	空気圧駆動システム
家庭内・耐水性	電動または人力

表 3.5.3 に示すように、ADS の新規性として特筆すべきところは、他の駆動システムが得意とする土俵においても様々な新しい長所をもつことである。

（４）まとめ

以上のように、新しい水圧駆動システム「ADS」は、これまでの駆動システムにない「クリーン性、環境性」という独自性と、「他の駆動システムの土俵内で種々の新しい長所をもつ」という新規性を有しており、今後、実績を積むと同時に認知度を上げることにより新しい駆動システムとして発展することが期待される。

参考文献

[1] 山口惇：水道水を作動流体とする可能性、油圧と空気圧、9 巻 4 号、205-210（1978）
[2] 川島正人：水圧駆動システム用ステンレス鋼、油空圧技術、42 巻 13 号、45-50（2003）
[3] 山科智四郎、宇佐見雄一、信田昌男、宮川新平：環境融和形水圧駆動システムの開発、

エバラ時報、175 号、3-8（1997）
[4] 吉灘裕、佐々木宏、成瀬俊久：海水圧駆動マニピュレータについて、油圧と空気圧、22 巻 6 号、618-625（1991）
[5] E.Urata, S.Miyakawa, C.Yamashina, Y.Nakao, Y.usami, M.Shinoda：Development of Water Hydraulic Servo valve, JSME International Journal, Series B, Vol.41, No.2, 286-294, (1998)

３．５．２　ADS のコスト要因の考え方

ADS 構築は、他の駆動方式からの代替分野と、今まで適当な駆動方式が存在しなかったために開発が進まなかった新分野にあたる。前者にあっては、既存の装置に比較して、機能面、品質面で利点があるものの、常に従来とのコストが問われることとなる。現行では、水圧機器の普及が十分ではないために、導入コストを比べると、ADS は、割高にならざるを得ない。多くの場合、油圧に比較して３～５倍程度である。この時点で、水圧化への道が閉ざされることがほとんどである。

今後導入に際し、コストは、**導入コスト、ランニングコスト、メンテナンスコスト**と**廃棄コスト**のトータルでの比較で論ずる必要がある。このことで、付加価値が大いに増大すれば、一次側エネルギー分野及び二次側エネルギー消費システムにとっても革新的なこととなろう。また、ADS の需要拡大のために必要なことは、それを導入することによって環境負荷が小さくなるということを、コストとして算出し示すことである。例えば、消防法の適用から外れることにより構造の簡素化が図れることや所轄消防署の検査諸費用が不要になるなど、コスト削減につながる。また、災害が未然に防止できることにより、火災保険や労災保険費用の軽減が可能になるなどである。

ADS の実用化に際しては、コストの問題を避けて通ることはできない。ここでは、イニシャルコストを含めたトータルコストという観点より ADS の経済性について述べる。

（１）イニシャルコスト

ADS の導入阻害要因として第一にイニシャルコストの高さが問題視される。しかし、剛性が高く、低粘度で圧力損失が小さいという水圧駆動システムの特徴を生かした加工精度の向上、加工精度を確保するための所要時間短縮による生産効率の向上といった、水圧駆動システムの動力伝達機能としての本来的なパフォーマンスが現段階では実現・認知されていない。より精密に、より早くを求めるのは製造業の常である。また、ADS 導入によるイメージアップ効果は企業戦略の中での重要性を増すであろう。技術課題の解決によるコストダウンとあいまって、用途拡大による本来機能の発揮と環境保護に関する社会的ニーズの高まりが ADS のコストパフォーマンスを上昇させていくと考える。

（２）ランニングコスト

ADS の導入により流体を調達する上での容易性・コストメリット、機器の洗浄に要するコスト削減が期待される。機器の洗浄という点については、頻繁に装置の洗浄を必要とする食品加工機械などの分野では、“洗浄のし易さ”に関わるコストと洗浄液の処理コ

ストに分けて考える必要があり、後述の環境・リスクマネージメントに通じる。一方で、当然の事ながら錆・漏れ・凍結などによるランニングコストの上昇を危惧されるところもあり、重要なコスト決定要因である事が確認された。また、ADS の特徴である高効率、エネルギーコストの安さについてはほとんど認識されていない、というのが実情である。

（３）周辺コスト

一般には、ADS の導入が防火設備・防火管理面のコストメリットに直接繋がるという認識はあまりない。このことより、駆動システムに起因する危険性が周辺コスト上昇の主な要因となっていない、言い換えれば現行の法制下では駆動システムの防爆性だけが向上しても、他の要因があるため工場・建屋全体としての周辺コストは減らないと考えるべきであろう。しかし、昨今のビル火災・工場火災の事例より、消防法による規制は厳しくなる一方である。

（４）環境コスト

ADS が環境融和性に優れていることは自明である。法規上または企業戦略上の理由で環境保護を目的として企業が支払うコストは年々増加傾向にある。作動流体そのものの廃棄、作動流体の混入した洗浄液の処理、作動流体の付着した廃棄物の処理などについて、水を作動流体として使用する場合の“環境コストメリット”は増加していくであろう。

（５）リスクマネージメントコスト

オイルミストの長期吸引が呼吸器疾患や喉頭癌、皮膚病、眼科疾患等の原因となることは既に指摘されている。作業環境の衛生管理面に完全を求めるならば、水よりも人体への影響が少ない流体を想定することは難しい。火災の危険性、使用流体や使用流体を洗浄した液が外部へ漏洩し環境汚染を引き起こす危険性、また使用流体と製品との相性において使用流体の製品への付着や混入が不具合に発展する危険性において、作動流体が水であることによるリスク低減効果は大きい。健康・環境意識の高まり、法規制の変化、グローバル化の中で、リスク回避のための管理コストや保険料と言ったリスクマネージメントに関わるコスト面で、ADS の優位性は増すであろう。

現在、国内で ADS が採用されている理由は、これらのコスト決定要因を総合的に評価した結果、ADS が最適であると判断された分野（食品包装機械、半導体製造）である。

すなわち、現在の社会情勢、法制下でもケースとしては少ないながら ADS が最適なトータルソリューションとなり得ている。社会環境の変化は、トータルソリューションとしての ADS の経済性を押し上げるであろう。

第４章　調査研究の成果のまとめ

本調査研究は、当工業会が培ってきた新・水圧技術（ADS）を、発電プロセスや大規模工場における排熱・蒸気・復水の一部を有効に利用すること、新たな用途への展開の可能性を調査することを目的としたものである。更に、この成果を広く一般産業等の分野で使用される機器、機械及びそれらの総合システムに適用できれば、現に我々が直面している環境、省エネ、低炭素化等の課題の解決に寄与できると考える。次の３項目について調査研究を行った。

(1)一次側エネルギー分野での ADS 導入の必要性と可能性を調査

(2)一次側、二次側共通応用技術である ADS「ロボティクスの駆動と制御」の適用と有効性の調査

(3)環境、省エネルギー化技術の視点に立った ADS 応用の展望

（注）ADSロボティクス：負荷条件や運転条件にかかわらず目標とする位置、速度、力などに自動的に追従する小型、高速、高精度のADSサーボシステムをADSロボティクスと称する。

４．１　一次側エネルギー分野でのADS導入の必要性と可能性を調査

本節では、(1)一次側エネルギー分野（火力発電、原子力発電等）(2) 一次側エネルギー分野（自然の力を利用する水力、風力や太陽光発電などのエコ発電）への ADS 導入の必要性と適用の可能性を調査し、更に(3)それを消費する二次側エネルギー消費システムへの展望を試みた。

（１）新・水圧技術(ADS)の従来型エネルギーシステムへの応用

最先端の火力発電所では、全体に排熱、排蒸気等のエネルギーはかなり有効に使われていることがわかった。しかし、まだ多くの火力発電所では排熱、蒸気、復水が多く生成されており、今後これらのもつ熱エネルギーを更に有効活用する余地がある。

一方、発電所内の設備装置の操業システムを見ると、制御弁の操作にほとんど油圧駆動が用いられている。作動流体には、安全上の理由から難燃性作動油が用いられており、作動油の管理等を考えると ADS の導入の検討は十分な価値がある。現状では、ポンプの駆動には発電した電力を用いているが、廃棄しているエネルギーを利用してポンプを駆動することができればエネルギー効率の向上につながる。その具体的方策として次の方法が考えられる。

①3MPa の高温再熱蒸気の一部を利用してタービンを駆動し、直接ポンプを駆動する方法

②カリーナサイクル（アンモニア水を媒体として使用する熱交換システム）を用いて低温度の流体（煙突から排出される 90℃程度の排ガスや吸入時よりも 7℃温度上昇している冷却排水）のもつ熱エネルギーを利用して発電する方法

③高温再熱蒸気の一部を利用してフリーピストンポンプ（燃焼ガスによるピストンの往復運動だけを利用する）を駆動し、ADS 水圧源とする方法

（２）新・水圧技術(ADS)の環境対応エネルギーシステムへの応用

現在わが国ならびに海外において研究開発が進められている様々な環境対応エネルギーシステムに対する ADS の応用の可能性について、水力発電（ダムゲート、ガイドベーン)、風力発電、太陽光発電、波力発電及び蒸気タービン発電の事例をもとに検討を行った結果を下記にまとめる。

①**水力発電**のダムゲート、ガイドベーンの駆動には、現在油圧駆動システムが使われているが、同システムにおいては可燃性流体を扱う関係上「消防法」の厳密な適用を受けなければならないため管理上難しい点がある。ADS 駆動を使えば、使用する駆動媒体が“水”であるため、「消防法」の適用を受けることなく、万が一の漏液の場合でも環境汚染の心配がない。ADS は、高出力、高速制御が要求されるダムゲートならびにガイドベーン制御においても十分応用可能である。

②**風力発電**には風速と風向きに適応した羽根の角度制御が必要である。つまり、風速の変化に関係なく、出力を一定に保持できるように羽根の角度の制御が必要である。羽根の角度制御は油圧駆動システムによって実現されている。風車には落雷の可能性が大きく、油圧駆動の場合は落雷によって火災が発生する恐れがあり、ADS 導入は有効な選択肢となる。また、風力発電を陸上から海上に移すことになると、羽根の角度制御に用いる油圧駆動の油漏れによる海の汚染問題が深刻化することは必至である。そのため、これを ADS 駆動とすることは有力な選択肢と考えられる。

③**太陽光発電**は現在、世界最大といわれる太陽光発電所はスペインのもので総出力は 2.3 万 kW である。今後建設予定のものでは、ドイツに 4 万 kW、オーストリアに 15.4 万 kW の発電所の計画が控えている。特に、米国の PG&E 社は 80 万 kW の太陽光発電契約を結んだと発表している。一方、シャープと関西電力は、大阪府堺市の臨海部において、大型の太陽光発電所と発電施設を共同で建設することを発表した。太陽光発電のパネルの汚れは受光障害をもたらし、発電効率を低下させることがある。地上設置の場合、汚れは風雨によって自然に洗い流されにくいため、機械による洗浄の必要がある。洗浄機械の駆動としてはパネルの雨水を集めて利用する ADS 駆動が有望な選択肢と考えられる。また、発電効率を向上させるため、発電基地で太陽を追尾するパネル駆動用として、ADS の適用が可能である。

④**波力発電**は、日本の港湾空港技術研究所の試算では、日本に押し寄せる波をすべて発電に利用できたとすると、3500万kWとなり、日本の総発電量の約1/3をまかなうことができる。波のエネルギーを全て利用することは難しいが、非常に多くの未利用自然エネルギーがあることは確かである。従来の海洋波力発電の多くは空気圧あるいは油圧駆動を利用しているが、空気圧駆動では空気圧のエネルギー密度が低いこと、一方、高エネルギー密度の油圧駆動では油の漏れが環境を汚染することなどの問題点がある。したがって海に設置される装置はADS駆動が適していると考えられる。

（３）新・水圧技術(ADS)を利用した二次側エネルギー消費システムへの展望

以上一次側エネルギー分野への ADS 適用の可能性について述べたが、ここでは主に二次側エネルギー消費システムへの展望について検討した。「環境と省エネルギー」は、今や産業から民生に至るあらゆる分野で要求される社会的キーワードである。環境といっても多くの内容、意味、定義、など多くの性格「環境の多面性」をもっている。かつ

て多くの環境汚染をもたらした、大気汚染、空気汚染、土壌汚染、水質汚濁などから端を発した環境意識は、今やあらゆる分野に浸透させねばならない状況に来ている。近年低炭素社会の構築から省資源、省エネルギーは環境の多面性の大前提とされる。ADS の応用において作動流体として「水」を利用することは、多くのリスクを抱える化石燃料使用の低減が図られ時代の要求に応える技術である。また、「省エネルギー」においては ADS 自身の駆動運転効率の向上はもとより、他のエネルギー発生システムとの**コージェネレーション**システムの構築の可能性を包含している。例えば、ADS から発生する流体損失による排熱をヒートポンプと組み合わせ、工場や生産ラインの洗浄湯として利用が可能であるなどはその一つでもある。以下にこの環境の多面性の中で一部実用化されているものもあるが、具体的応用可能な分野を示す。

①**清浄、衛生、クリーン環境分野**としては、・食品加工機械、医療・医薬・飲料、製缶、包装機械、半導体、精密密成型、クリーンルーム対応、完全オイルフリー場

②**特殊環境分野**では、原子力発電システムは対放射能から水中での作業が要求される。一次側エネルギー供給サイトの燃料棒駆動システムがあるが、二次側エネルギー消費作業の炉心周辺装置、炉心内部検査装置、放射性廃棄物処理、廃炉技術への応用。今後予想される原子炉の廃棄時の作業機械、自動機械への応用が期待される。

③**自然環境保護分野**では、河川・臨海近隣の駆動機械、水中作業機械、海洋開発機械への応用として、河川ゲートやポンプ場のゲート、河川の魚道床の昇降などでは既に実績が出始めている。水中、海中機械では近年臨海の海底資源発掘作業が話題になり始めている。海外では計測器を海中深度の任意の深さに定めてそのコントロールに ADS が利用されている例が報告されている。イギリスで ADS の開発は日本と同様 1975 年頃開始されているが、北海油田採掘、発掘に用いる海中工具に端を発している。

④**防爆安全分野**では、3K（暗い、汚い、キツイ）の排除、一般産業・生産/加工機械生産現場、鋳物関連

⑤**防災・対人安全分野**では、消防機器、レスキュー機器、医療、福祉機器、高齢化・身障者対応住宅設備機器、スポーツ、レジャー（稼動床プール、体感マシーンなど）、劇場、舞台の設備駆動

特に、特殊環境における作業機械、レスキュー機器などにおいては、多自由度の ADS ロボティクスの開発が求められている。

４．２　一次側、二次側共通応用技術である ADS「ロボティクスの駆動と制御」の適用と有効性の調査

前項において、一次側エネルギー分野及び二次側エネルギー消費システムにおけるエネルギー有効利用の目的で、環境調和に優れた新・水圧技術（ADS）を応用することの有効性が明らかとなった。本項では、ADS ロボティクスシステムの実現の可能性を、構成する水圧機器と、システム構成及び制御技術の面から検討した結果を示す。

（１）水圧機器－シリンダ、モータ、バルブ、アキュムレータ、シール･パッキン等々

ここでは ADS ロボティクスシステムを構成するために必要な水圧サーボシステム及び水圧源ユニットを含む周辺装置の構成に必要とされる水圧機器について、その現状と

今後の課題等について調査・分析を行った。具体的には、水圧サーボ弁、水圧比例弁、シリンダ、水圧モータ及びそれらを駆動する水圧源を構成するために必要となる、ポンプ、リリーフ弁、方向切換弁、アキュムレータ及び各機器に組込まれその性能に大きな影響を及ぼすシール・パッキンについて調査を行った。調査対象とする機器の基本仕様は、一次側エネルギー分野への応用においては、東京電力（株）川崎火力発電所の見学で知り得た蒸気タービン周りの駆動制御用油圧システムの仕様に基づいて設定し、二次側エネルギー消費システムへの応用に関しては、一般産業用として広く応用がみられるロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムとし、その基本モデルとして本調査研究で試作を目指す ADS ロボティクスシステムの基本構想に基づいて設定した。これらに適用できる水圧サーボシステムを構成するために必要となる水圧機器について、水圧機器メーカのカタログ及び「平成 15 年度アクアドライブ技術の実用化に関する調査研究報告書」等から、採用可能な機器を抽出し、機能・性能について調査検討するという方法で行った。結果を以下に要約する。

● 一次側エネルギー分野及び二次側エネルギー消費システムへの ADS の応用において共通する基本技術はロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムに集約できる。それを実現する水圧サーボシステムを構成するために必要となる主要な水圧機器の入手可能性と基本性能を調査した結果、本調査研究で試作を目指す ADS ロボティクスシステムの基本モデルは現状で入手可能な水圧機器により構築することができ、目標とする機能を実現することは可能であることが確認できた。ADS を用いたロボティクスシステムはこれまでに実現された例がなく、本調査研究で計画する試作モデルによりその機能の実現が確認できれば、一次側エネルギー分野での ADS ロボティクスシステムの応用はそのスケールアップにより可能となるものと考える。

● 一次側エネルギー分野で使用される機器に対しては一般産業用に比べより高い信頼性が要求される。また高温環境で使用される可能性が考えられる。東京電力（株）川崎火力発電所の蒸気タービン周りの駆動制御システムで要求される基本仕様に基づいて今回の水圧機器の調査結果をみると、今後の課題として次のようなことが挙げられる。水圧サーボ弁、水圧比例弁、電磁切換弁においては大流量化、リリーフ弁では大流量に適用できコンパクトで圧力オーバーライドの小さいバランスピストン型リリーフ弁の製品化、水圧シリンダ、シール・パッキン及び水圧ポンプでは長寿命化と高信頼性化が主要な課題として考えられる。高温環境下での使用を考えた場合、特にシール・パッキンに関して高温状態での特性の把握が必要となる。水圧モータに関しては、一般産業用ロボティクス技術を基盤とするマニピュレータシステムへの応用を考えた場合、一般に低速・高トルクの駆動が要求されるため、減速機構の小型軽量化と高効率化、更には低速・高トルク水圧モータの開発が望まれる。

（２）システムと制御

本項では一次側で回収されたエネルギーをもとに、ADS ロボティクスを構成するアクチュエータを制御するという観点から、システムと制御についてまとめた。具体的にはサーボ弁による水圧シリンダあるいはモータの制御を行うための制御システムの設計及び達成される性能について述べる。これらの結果は今後 ADS ロボティクスを実現、

応用する上での一つの評価指標を与えている。

発電所内の発電サイクルにおいては、現在最も効率が良いとされる MACC 発電（More Advanced Combined Cycle：東京電力（株）川崎火力発電所 1,500℃級コンバインドサイクル発電）においても熱エネルギー変換効率は 60%未満に留まっている。そこでは主に復水が多く利用されており、今後これらのもつ熱エネルギーを更に有効活用する必要がある。一方発電所内にはタービンブレードの迎角制御、緊急遮断装置制御、高低圧蒸気の制御、流体制御のための制御弁及び所内の機器メンテナンス装置の駆動等、多くのアクチュエータ制御ニーズがある。これらの多くは油圧あるいは空気圧で駆動されているが、従来廃棄していたエネルギーを活用して圧力のエネルギーとして回収することができれば、完全オイルフリーによる高い環境調和性と CO_2 排出の低減化、省エネルギー化、省資源化に優れた水圧システムを適用する効果は大きい。同時に水のもつ不燃性は防災上も非常に有利であり、この観点からもメリットがある。この意味で ADS ロボティクスは一般産業用機械への適用も含むシステムとして環境適合度が高い。本節では精密で操作性に優れ、小型、高速、高出力で安全性を有する ADS ロボティクスシステムの基本的な構造及び制御に関して得られている成果をまとめ、発電所内及び一般産業用機械への適用の可能性について考察を行った。表 4.2.1 に発電所内における流体制御アクチュエータと目的と仕様を示す。以下に結果を要約する。

サーボ弁を用いた ADS ロボティクス制御は、二次側エネルギーの利用として発電所内及び一般産業用機械への適用にあたり制御仕様を十分に達成できると判断する。負荷変動やモデル化誤差を事前に制御器設計に反映できるロバスト制御理論の適用が効果的であることを示し、発電所内での利用を含む一般産業用機械の制御を行う観点から構築する基本モデルを用いて、ADS ロボティクスシステムの一次側エネルギー分野への応用性を確認することができるものと考える。特にメンテナンス装置や一般産業用機械では回転運動を必要とする制御ニーズが多いものの、先述したように水圧モータ制御に対して十分な研究・応用結果が得られているとは言い難い。その意味でも今後は ADS ロボティクスが十分なポテンシャルを有することを示す必要がある。

表 4.2.1　発電所内において必要とされる流体制御
アクチュエータとその目的及び仕様

アクチュエータ	用　途	圧力源元圧	目　的	期待される制御精度
水圧シリンダ	各種弁開度制御、ﾀｰﾋﾞﾝｶﾞﾊﾞﾅ制御、ﾀｰﾋﾞﾝﾌﾞﾚｰﾄﾞ角度制御ﾒﾝﾃﾅﾝｽ機器制御	3-50 MPa	位置制御	全ｽﾄﾛｰｸ 0-250mm に対し 100μ ｵｰﾀﾞ
			速度制御	最大 50m/s 程度
水圧モータ	各種弁開度制御，メンテナンス機器制御，エレベータ駆動		力制御	0-15kN
			角度制御	1 °ｵｰﾀﾞｰ
			速度制御	数 10-1000rpm
			トルク制御	－

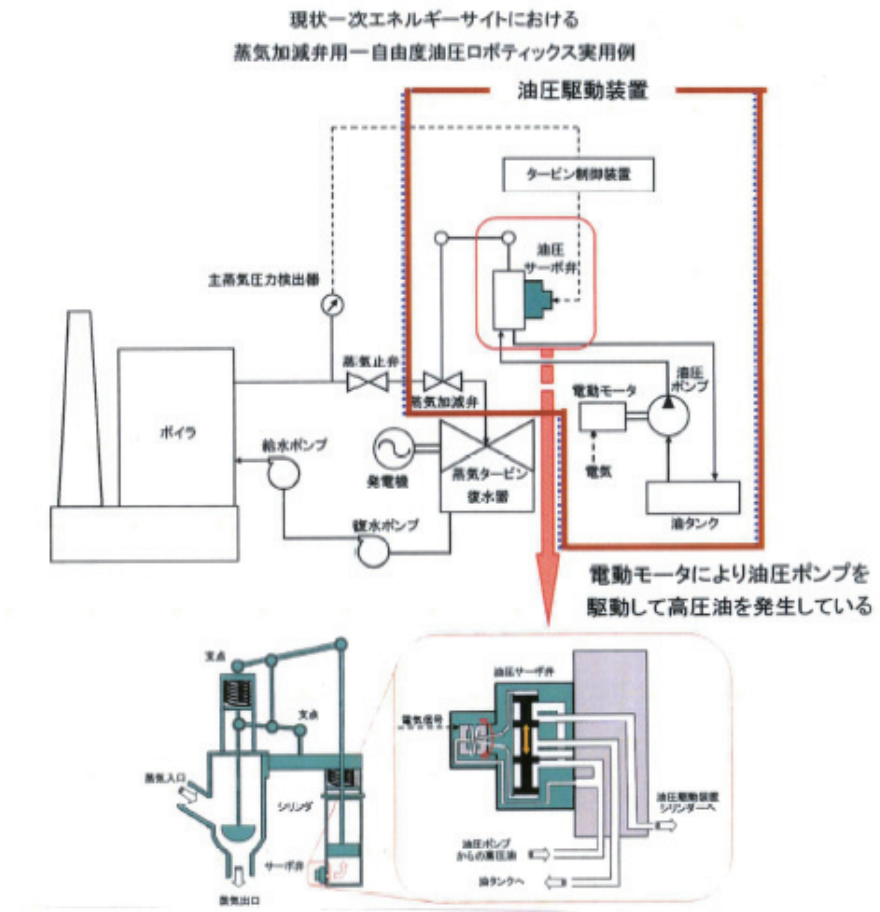


図 4.2.1　油圧ロボティクス実用例

４．３　環境、省エネルギー化技術の視点に立った ADS 応用の展望

ADS 技術は作動流体に「清水」を用いたエネルギー伝達技術である。これまで本技術の特長から防爆・安全はもとより、衛生・クリーンそして「水の有効利用」の視点から省資源などのコンセプトのもとに研究開発と市場への導入を図ってきた。ADS の特長を生かすべきものづくりの製造プロセスにおいては、生産の効率化を目標に省エネルギー化を追求してきた。いわゆる「低炭素化社会の構築」が解決すべき重要課題となった 1973 年のオイルショック以来、地球環境の視点から化石燃料の多用による温暖化を最小化する努力により日本の「省エネルギー」技術は世界のトップレベルにまで磨かれた。当初は生産工程の合理化、機器や装置の効率向上などのグロスの省エネルギー化が主体であった。その後、更に発展し、排熱回収することにより、ネットの消費エネルギーの削減に向けられた。今回の調査結果によれば、排熱量の多い業種は電力、化学、鉄鋼、清掃、窯業、紙パルプ、石油の順である。排熱回収発電は 1980 年代からこれらの業種で始まり、その後、廃プラなど利用して更に付加価値の向上や環境対策が発展してきた。

さて、これまでの油圧、空気圧が主体であったフルードパワー技術の省エネルギー技術においても機器やシステムの効率向上に努力がなされ発展した。ADS としてのフルードパワー技術は「水を作動流体」とする、従来にない特徴を生かした応用の可能性とその検証である。省エネルギー技術は、広くは家電を含め、一般産業における基本技術であることは論を待たない。ADS 自体においても機器や装置の省エネルギー運転についてこれまで検

討され、一部実証されつつある。しかし、ADS の技術的本質である「水」を作動流体に用いていることから電動、油圧、空気圧など他の駆動源には見ない特長を生かせることができれば、従来にない新たな付加価値を有する技術として社会への貢献が期待できる。そのような視点に立って、コージェネとの融合を基本として、産業領域から発生する排熱の更なる有効利用の可能性を知るために、排熱の発生が多いといわれる業種から排熱される熱の質とその利用などの資料を収集して、①排熱の利用形態②熱の発生形態を排熱の視点から③熱の質④蒸気の駆動源としての応用等を調査し、ADS 技術導入の可能性について検討した。以下に結果を要約する。

- 比較的高温蒸気を使用した発電やシステムにフィードバックして熱効率の向上が図られている。高温といっても 200℃程度の排熱も動力への利用が可能であり、実用化されつつあることがわかった。これらの応用に必ず付随する技術に蒸気量を制御する機構が必須である。一次側エネルギーサイトでは蒸気量の制御を確実で安全性の高い特性が必要で、従来は主に油圧駆動が利用されている。蒸気タービンで発電が行われている。その主力は蒸気量を制御する蒸気加減弁は油圧駆動システムが採用されている。油圧ポンプは電動機によって駆動されている。電力、鉄鋼、化学、清掃などいずれも大規模で操作性と安全性に優れ、かつ防爆などの措置は必須である。この様なサイトは燃料、高圧危険ガス、高出力電圧、高温多湿場などの環境の中での使用でもある。
- ADS は作動流体に「清水」を用いた「駆動と制御」（モーションコントロール、ロボティクスなどと呼ばれる技術）であるので、この様な雰囲気でのサイトでの応用は、ADS の長所を生かせる場であると考える。

最後に、既に先に述べているが ADS の一次エネルギー分野及び二次エネルギー消費システム分野（一般産業分野）への適用の必然性について要約する。

＜一次エネルギー分野への適用＞

- 発電所内の設備装置の操業システムを見ると、制御弁の操作にほとんど油圧駆動が用いられている。作動流体には、安全上の理由から難燃性作動油が用いられており、大量の作動油の管理等を考えると ADS の導入の検討は十分な価値がある。現状では、ポンプの駆動には発電した電力を用いているが、廃棄しているエネルギーを利用してポンプを駆動することができればエネルギー効率の向上につながる。
- 発電所（火力や水力）では水や蒸気を制御する必要があり、したがって水を作動流体とする ADS は、これらと親和性が強く、防災上のリスクも非常に小さくなるので有利である。
- その他の種々の発電所でも、油圧にくらべて ADS 利用の有利さは際だっている。
  風力：落雷火災の防止、波力：汚染に無縁、太陽光：洗浄、原発：水は放射性化しない。

＜二次エネルギー消費システム分野（一般産業分野）について＞

- 新しい水圧駆動 ADS は、単に油圧を水圧に替えるという技術ではなく、今まで油圧が適していないためあまり使われなかった、食品加工産業、介護機器、水中機械、半導体モールド、原子力設備操作検査機器産業等にも、高機能な流体制御の恩恵が与えられる技術である。

●新しい水圧駆動 ADS は、油による環境汚染を起こさない、清浄で高機能な流体制御技術であり、また防災上も有利であり、今後発展して多くの場面で必要となる技術である。
●流体制御技術は高機能を売り物とするものであるが、今後は清浄な特長を持つ新しい水圧駆動 ADS の展開を機軸に、フルードパワーテクノロジー（FT）へと発展する。
●新技術の宿命であるコストについては、ADS の場合現段階では材質的に高価なものを使用し、量産されていないなどイニシャルコストだけの比較では、油圧機器等に比し不利がある。しかし、ランニングコスト、トータルコストで見れば十分有利である。あくまでトータルソリューションとしてみれば ADS の経済性が発揮される。

第５章　調査研究の今後の課題及び展開

作動流体が「清水」であることを基本コンセプトとする ADS 応用の可能性について以下の視点で調査した。一次側エネルギー分野においては排熱の有効利用に関し、蒸気を主体にしたタービン系で構成される「ADS とコージェネの融合」という視点で、併せて二次側エネルギー消費システムでは、「環境、省エネルギー、省資源に寄与する水の有効利用」の視点から検討した。以下に ADS 導入にあたり今後の課題と展開について要約した。

５．１　今後の課題

一次側エネルギーサイトでは蒸気量の制御は確実で安全性の高い機能が必要で、現在は図 5.1.1 に見られるように主に油圧圧駆動が利用されている。油圧ポンプは電動により駆動され、圧油は油圧サーボ弁へ供給される。ここでは油圧サーボ弁と蒸気弁のシリンダを駆動する一自由度ロボティクス系を構成している。ADS 応用の場合は、一次側エネルギーサイトからの蒸気を蒸気タービンへ導き、タービンで水圧ポンプを駆動する。水圧ポンプからの圧力水を油圧同様な「水圧ロボティクス」システムに供給する仕組みである。この様な背景から、ADS 導入のための重要課題は、まずは、供給水で仕事をする高速、高精度でしかもコンパクトな ADS ロボティクス技術となる。

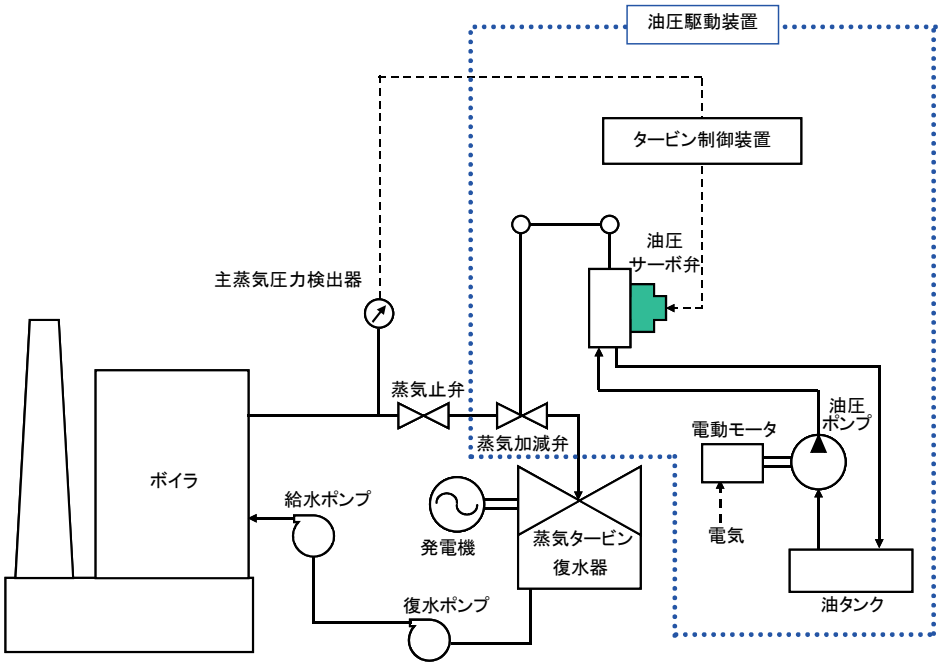


図 5.1.1　従来の一次側エネルギーサイト全体図

この様な仕組みは、一次側エネルギーサイトの重要機能要素であることは前章までに説明している。二次側エネルギーサイトでの ADS の利用は、今後、発電所の MACC 化で高性能化、複雑化の傾向はあるが、例えば東京電力㈱川崎火力発電所では、抽気蒸気を近隣の工業団地に配給して、排熱を他の目的のために利用する仕組みを構築して実用化されているので、この様な配給蒸気を一般産業機械の駆動に利用することは可能であり、そこで ADS ロボティクスを導入するきわめて重要な蒸気エネルギーとなる。

ADS 導入の課題は、駆動制御を行う各種弁開度の高速、精密制御、タービンガバナ・ブ

レード制御等のシステムをモデル化し、有効性を確認することである。ただし、タービン駆動水圧ポンプは小型の蒸気タービンが市場に出ているので当面はその技術を利用することが可能であることから、優先的課題を直線運動のシリンダロボティクスと回転運動の水圧モータロボティクスが重要課題となるが、システムと制御の節で説明したように技術的難易度の高い「回転関節 ADS ロボティクス」を優先課題として今後その各種機能検証に取り組む。

図 5.1.2 及び図 5.1.3 は、ADS が上述した発電システムでどの様な位置づけであるかを示した。

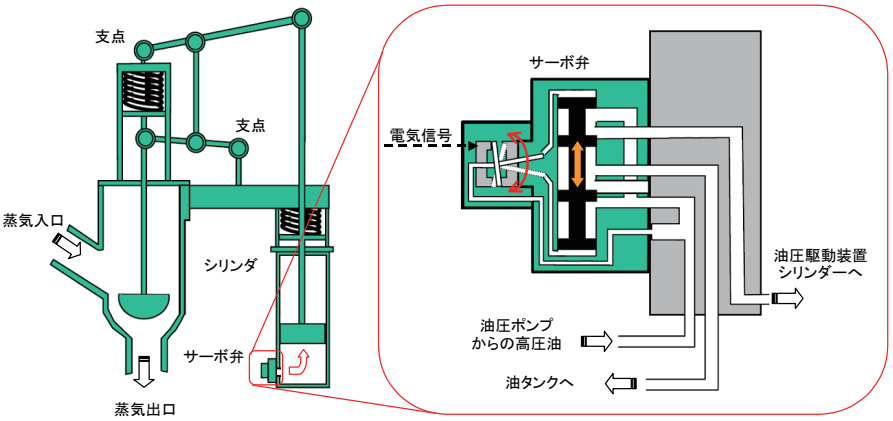


図 5.1.2　蒸気加減弁とそれを駆動する油圧ロボティクス

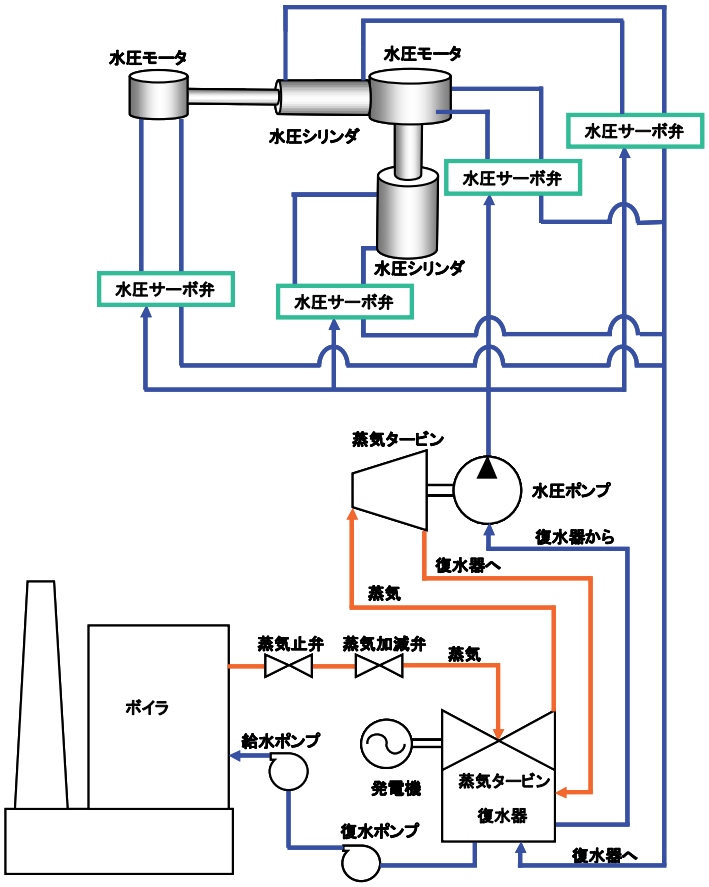


図 5.1.3　一次側エネルギーサイトと ADS ロボティクス

５．２　今後の展開

特に排熱の発生が多いとされる発電を中心に鉄鋼、ごみ焼却における現状を調査した。鉄鋼、ごみ焼却など排熱の比較的多い分野への ADS の導入における状況は発電システムと類似している。発電に関しては火力、原子力がその代表例であり、当初は東京電力（株）の原子力関係者のご意見、ご助言を頂き、また関係者のご同行を頂き、ADS の紹介をさせて頂きながら最先端火力発電所の具体的施設の見学調査を行った。火力発電サイトから蒸気加減弁の駆動に油圧技術が使われており、防爆・安全の面から作動油の保管管理、消防法による厳しい指導などの煩わしさのあることなど強調された。したがって、将来 ADS の技術が確立されれば導入の意味があるとの発言もなされた。そして排熱の更なる有効な方法として川崎火力発電は質のよい排熱（蒸気）を発電所の近隣地区に配給する仕組みを構築している。この様な仕組みは発電所のみならず、一般産業分野での ADS の応用の可能性を示唆するものである。ADS は作動流体に「清水」を用いる機械の駆動・制御技術である。それ故発電プロセス、ごみ焼却場等で発生する排熱、蒸気、復水どのエネルギーや流体を ADS に利用することも可能な技術である。

ADS ロボティクスの技術が確立されれば、発電所のみならず一般産業機械の駆動に利用可能であり、環境、省エネルギー、省資源に寄与するものと確信する。

図 5.1.3 は、一次側エネルギーサイトからの蒸気を蒸気タービンへ導き、タービンで水圧ポンプを駆動する。水圧ポンプからの圧力水を油圧同様な「水圧ロボティクス」システムに供給する仕組みである。この様な仕組みは一次側エネルギーサイト、二次側エネルギー消費システムいずれにおいても基本となる機能である「ADS ロボティクス」技術は極めて重要な技術であることから、その実用化を実現するためには、まず実験室的モデルを念頭にモニタースケールを構築し種々検証を行う必要がある。「ADS ロボティクス」技術の検証後、実負荷試験による確認が必要である。しかる後、図 5.1.3 に示すタービン駆動の水圧ポンプと ADS ロボティクスをリンクしたシステムの構築し、実用に供されるモデルによる機能検証を経て導入を図る。

あ と が き

「新・水圧技術（ADS）を用いたロボティクスの新基軸応用に関する調査研究」の活動は、調査期間の制約の下に行われたが、初年度の調査研究の要点をここにまとめる。

水圧技術（ADS）の特徴

ADS は「水道水」「清水」を作動流体とする駆動技術であり、現在広範に使用されている油圧駆動、空気圧駆動、電気駆動に比べ、作動流体の特性に基因して、制御特性、作業者や作動環境との調和、保全等の点において総合的に優位にある。もちろん、「水」の特性から潤滑やキャビテーションに係わる課題もあるが、基本的な解決法が明らかになっている。イニシャルコストについては、新技術に共通する課題はあるが、トータルコストとしての評価を高めつつある。

一次側エネルギー分野での ADS 導入の必要性と可能性

最先端の火力発電所では、排ガス中の排熱をぎりぎりまで絞り込んでおり、それを発電効率向上に結びつけることは難しいであろう。むしろ、発電所周辺の事業所への抽気蒸気の適切な配分により、また排熱を新産業の創生や生活環境の向上に活用して、トータルシステムの効率向上を図ることが合理的であろう。他方、統計資料によると、火力発電所、一般産業用プラント、ごみ焼却プラント等においては排熱が多く、排熱回収による効率向上の可能性は高い。いずれの場合にも、発電設備装置の操業システムの制御性や安全性への要求はますます増大することになる。

自然エネルギーの利用である水力発電、風力発電、太陽光発電などにおいても、設置場所の環境保全、安全確保のため、プラントの適正な運転制御が要求される。

これらの要求に対し、環境調和性のある ADS が原理的に適合するし、加えて、油圧制御に匹敵する制御特性が得られることから、ADS の導入と発展が期待できる。

ADS「ロボティクスの駆動と制御」の適用と有効性

一次側、二次側共通の応用システムである ADS ロボティクスシステムの可能性を、水圧機器と、システム・制御技術の両面から検討している。一次側エネルギー発生システムとして、最先端火力発電所の調査見学時の情報に基づくと、ADS の水圧源圧力は 14 MPa、サーボ弁応答周波数 100 Hz、水圧シリンダの位置決め精度はストローク 0～500mm において 100μm あり、現在、入手可能な機器で構成できるレベルと判断できる。なお、発電プラントでは高い信頼性が要求されるから、ADS ロボティクス構成機器の寿命や保全に留意する必要がある。

二次側エネルギー消費システムへの応用では、一般産業用に広く採用されるロボティクス技術を想定すると、基本仕様は、入手可能な機器で対応可能である。ただし、一般産業用では回転運動を必要とする制御ニーズも多いことから、水圧シリンダ制御に比べ実績が少ない水圧モータ制御の開発研究が望まれる。

調査研究のまとめと今後の展開

本調査研究は、発電所（火力・原子力）の主に排熱の有効利用を前提にした、新・水圧技術（ADS:Aqua-Drive-System）の適用に端を発している。東京電力㈱川崎火力発電所を見学調査したところ、同発電所では、**抽気蒸気を近隣の工業団地に配給して、排熱を他の目的のために利用する仕組みを構築して実用化されていることが判明した。また、**ADS がどの様に適用可能であるかを調査した結果、現在、発電プラントの蒸気量制御に主に油圧駆動が利用されていることがわかったが、一方問題点として防爆・安全の面から装置の保守管理、作動油の保管管理など消防法による厳しい指導などの煩わしさのあることが強く指摘された。通常油圧制御の場合には、作動油の保管・防火管理、油汚染の防止措置、廃棄処理等の費用を要し、加えて消防法の第４石油類の規定をクリアするため、防油堤、吹き抜けなどを設置するため、通常建屋の２～３倍の建設費が必要となる。更に消防法のチェック、安全管理者、火災保険（家屋保険に危険物対象保険が上乗せになる。）等が必要となる。一方、ADS を採用すると当初のイニシャルコストは、2～3 倍に達すると考えられるが、前述した火災防止対策等が不要なため、これらのコストは 4～5 年で回収できるものと考える。このため**火力発電所における ADS の応用が適切な分野であることが明らかとなった。**なお、本調査研究を進めるに当たり、電力会社側からの委員の推薦もあったが、今回の調査が短期間であるため次年度以降の機会に委員会への参加をお願いする旨回答している。

ところで、現在の火力発電所の発電量を制御するための蒸気量の制御に油圧駆動方式が採用されていることは既に述べてきたが、具体的な制御方式としては、油圧ポンプは電動機により駆動され、圧油は油圧サーボ弁へ供給され蒸気弁のシリンダを駆動する**一自由度**ロボティクス系を構成している。加えて、冷却水の流量や圧力を制御するため**電動機等による回転制御も行われている。これらの制御に必要な基本仕様は、現在の ADS の機器で十分対応可能である。ここで ADS を応用する場合は、一次側エネルギーサイトからの蒸気を蒸気タービンへ導き、タービンで水圧ポンプを駆動するシステムで代替可能である。**ただ、このシステムを導入するには、駆動制御を行う各種弁開度の高速、精密制御、タービンガバナ・ブレード制御等について諸性能を確認することが必要である。このため、まず実験室規模の ADS シリンダ及びモータの一自由度のシステムについて検証実験を行い、火力発電所における蒸気量制御弁の駆動制御の実用性を明らかにする。**第一ステップとして、直線運動を中心とした機能検証を行うとともに第二ステップとして回転運動（水圧モータ）及び組合せシステムの構築と機能検証を行うものとする。**

ADS は作動流体に「清水」を用いる機械の駆動・制御技術である。それ故発電プロセス、ごみ焼却場等で発生する排熱エネルギーを利用して蒸気タービンにより水圧ポンプを駆動して ADS に利用することが可能となる技術である。**ADS ロボティクスの技術が確立すれば、火力発電プラントの蒸気量制御システムのほか発電所の冷却水（主に海水）取水槽側面や底面に付着堆積する海生生物や塵芥を除去する水中排砂ロボットや角溝清掃装置への応用のみならず・ごみ焼却プラント・一般産業機械・原子力発電プラント等への展開が可能となり、省エネルギー、省資源化に寄与するものと確信する。**

－禁無断転載－

システム技術開発調査研究　　２０－Ｒ－１３

「新・水圧技術（ADS:Aqua-Drive-System）を用いたロボティクスの新基軸応用に関する調査研究」報告書

平成２１年３月

作成　財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目４番２８号
TEL　０３－３４５４－１３１１

社団法人 日本フルードパワー工業会
東京都港区芝公園３丁目５番８号
機械振興会館３１１号
TEL　０３－３４３３－５３９１