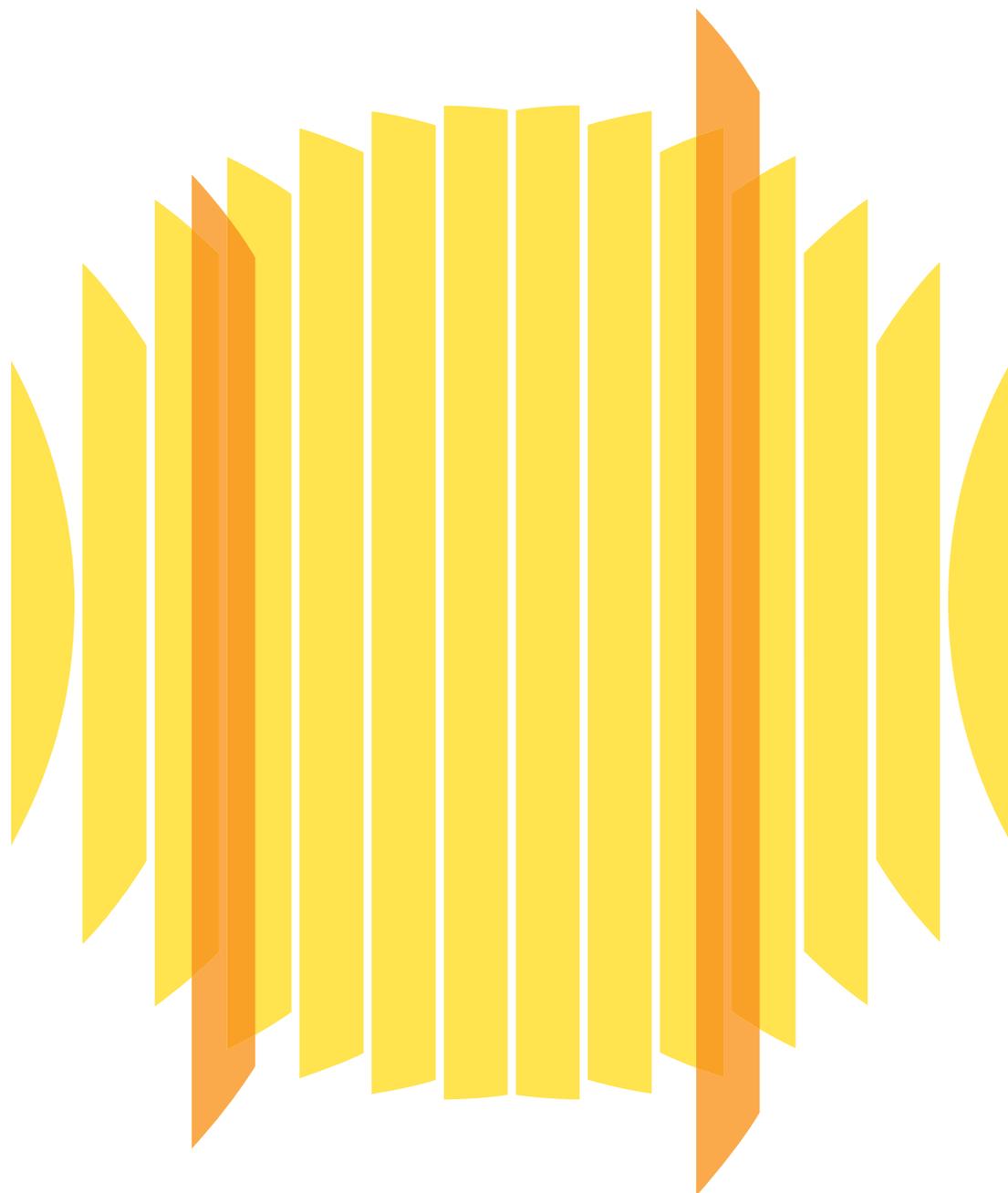


季報 エネルギー—総合工学

Vol. 37 No. 3 2014.10.



一般財団法人 エネルギー—総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【巻頭言】

中国の太陽熱発電開発を目の当たりにして

新潟大学 工学部 化学システム工学科 教授 児玉 竜也 …………… 1

【寄稿】

A-USC 石炭火力高効率化技術の内外における最新動向

三菱日立パワーシステムズ(株) 電力計画部 主管技師 齊藤 英治 …………… 3

【寄稿】

バイオマス専用粉砕方式による既設微粉炭焚きボイラでの

混焼技術の実用化開発（混焼率増大技術の開発）

バブコック日立(株) 呉事業所 呉ボイラ技術部 主管技師 金本 浩明 …………… 12

【調査研究報告】

福島第一事故後の安全確保の考え方について

～各分野の専門家との意見交換から～

原子力工学センター 次世代軽水炉開発グループ 主管研究員 久田 司 …………… 23

【調査研究報告】

環境適合型・高効率バイナリー発電の技術開発

プロジェクト試験研究部 部長 蓮池 宏

プロジェクト試験研究部 参事 小川紀一郎

プロジェクト試験研究部 研究員 大内 優

元プロジェクト試験研究部 特別嘱託研究員 堀口 章

(株)アーカイブワークス 代表取締役 松尾 栄人

(株)アーカイブワークス 製造部長 松尾 雅智 …………… 32

【調査研究報告】

米国と中国のIGCCの現状

理事・プロジェクト試験研究部 部長 小野崎正樹

プロジェクト試験研究部 主管研究員 坪井 繁樹 …………… 44

【研究所のうごき】 …………… 54

【編集後記】 …………… 57

巻頭言

中国の太陽熱発電開発を目の当たりにして

児玉 竜也 (新潟大学 工学部
化学システム工学科 教授)



現在、IAEのSolarPACES (Solar Power& Chemical Energy Systems) プログラムの国際会議で北京に来ている。IAEのSolarPACESプログラムは1977年に開始された国際プログラムで、太陽集熱利用技術(発電と化学プロセスへの利用)の国際的共同開発を40年近く牽引してきた。現在、19カ国がメンバーである。日本は80年代のサンシャイン計画の時はメンバーであったが、その後、脱退して現在に至っている。今回、この学会が初めてアジア地域で開催される記念すべき大会である。

私自身は1998年からこの学会に参加しているが、当時は全体で100名に満たない参加者であった。80年代に米国カルフォルニア州で350 MWの太陽熱発電(CSP)プラントが実用化されたが、90年代に入ってから新規プラントの建設が中断し、90年代後半は最も活動が低調な時代であった。しかし、2000年初頭から米国エネルギー省が太陽熱発電の再評価を行い、これをきっかけに米国、スペイン等で新規のプラント建設が息を吹き替えた。これに呼応して2000年代後半辺りから当学会の参加者は1,000名を超え始めた。2010年あたりがプラント建設のピークであったが、この頃に太陽電池(PV)の価格が急激に下がり、最近ではプラント建設数が、また足踏みを始めた感がある。今後、PVに対抗して、どうやって太陽熱発電が生き残っていくかが課題だが、昨年の学会では「昼間の発電は太陽電池に任せ、蓄熱で夜間に発電できる太陽熱発電は、夜間電力の供給に(時にイブニングピークに)貢献しては?」という雰囲気もあった。学会は今日から始まったが、今年の学会ではどのような方向性がみられるであろうか?(南アフリカではイブニングピークに通常電力の2.7倍のソーラー電力の買い取り制度(FIT)を導入するという。)

この分野においても中国の躍進には驚くべきものがある。98年には中国からの参加者は居なかったが、あっという間に日本の頭を飛び越して太陽熱発電プラントを精力的に建設し

ている（性能はまだ良くないように思えるが）。このような状況でどのように日本が CSP ビジネスに入っていくか？単なる低コスト化では中国には勝てないだろう。日本の高い技術力を持って、より高性能で信頼性の高い技術開発を目指すべきであろう（例えば日本の新幹線技術のように）。いずれにしても日本企業には長期的展望を持って“しぶとく”開発を行ってもらいたい。ある日本企業に聞いたところによると、2006年頃から米国にコンタクトし始め、米国の国立研究所でデモを続け、最近になってやっと米国の CSP プラント建設のコンポーネントを一部、受注したという。

CSP の開発が PV と比べて不利な点は、発電容量がかなり大きくなるとコストダウンが効果的に起こらない点である。コストダウンを有利に展開するには、数百メガワットからギガワットのプラント建設が必要な段階に来ているが、これを行うには巨大な資本投資が必要である。段階的に PV モジュールを増やしてキャパシティをあげられる太陽光発電なら、投資も段階的に投入してリスク回避をしながら開発できるが、CSP の開発ではそれが難しい。こういう背景から CSP 開発には、より国の資金援助が必要である。こういった状況に対して日本政府の太陽集熱利用開発に対する援助は十分とは言えない。まずは日本政府が SolarPACES プログラムにもう一度、加盟し、積極的に日本企業を牽引していくことが急務と思う。アジアでは中国も韓国も既に SolarPACES のメンバーである。

最近、米国に建設された 100～400 MW 級の CSP プラントが今年から来年にかけて送電を始める。これが良い成果を生めば、また、CSP プラントの建設が世界で活発になるであろう。このチャンスに乗り遅れてはいけない。（一財）エネルギー総合工学研究所は、一昨年から集光型太陽熱利用研究会を立ち上げ、現在、29 社の日本企業のネットワークをこの分野で構築している。是非とも長期的展望を持ってこの活動を維持していただきたい。

[寄稿]

A-USC 石炭火力高効率化技術の内外における最新動向

齊藤 英治 (三菱日立パワーシステムズ(株)
電力計画部 主管技師)



1. はじめに

2014年4月に、わが国の新しいエネルギー基本計画が閣議決定された⁽¹⁾。その計画の中における石炭火力発電の評価は、温室効果ガスの排出量が多いという問題があるものの、安定供給性と経済性に優れているので、環境負荷低減に応えるために、高効率発電技術や温室効果ガスの排出を抑制する技術開発の活用が推進されている。また、アジアなどの新興国を中心に、安価な石炭の利用が今後も引き続き拡大していくことが予想されることから、環境負荷低減と電力安定供給の両立に貢献するため、わが国の先端的な高効率石炭火力発電の輸出が促進されている。

700℃級先進超々臨界圧発電技術(A-USC, Advanced-Ultra Super Critical)開発は、石炭火力発電の高効率技術の1つとして、2008年より経産省の補助事業として具体的な要素技術開発が推進されている⁽²⁾。石炭火力発電の最新の蒸気温度は600℃級であるが、A-USCでは更に100℃高温化させ、送電端HHVで46%程度(発電端LHVで50%超)の高効率発電の実現を目指すものである。この高効率化を支えるキー技術は、石炭火力発電の主機であるボイラやタービンの高温部材に適合する新たなNi合金を開発することにある。

本論では、A-USC開発の意義および近年欧州のみならず、米国、中国、インドなど各国で開発されてきている状況を説明するとともに、

わが国での開発経緯、現在の進捗状況などについて紹介する。

2. A-USC 開発の意義

A-USC開発による高効率化は、単にランキンサイクルにおける蒸気条件を高めるものであって、ボイラやタービンといったプラント主機の一部が高温化の機能を持つものである。プラントシステムが大きく変わることは無い。そのため、プラント運用の方法も従来の石炭火力と大きく変わることが無く、かつ石炭処理や水処理などのインフラ設備も従来とほぼ同様の設備が流用できる。すなわち、経年石炭火力のリプレースによる高効率化計画を立てるにあたり、A-USCの利用は現状設備をベースにした計画が比較的容易に立てられる利点を持つ。

図1にドイツ大規模発電所技術協会(VGB)による高効率石炭火力のロードマップを示す⁽³⁾。2000年頃の世界の石炭火力発電の発電効率 η (LHV)は30%程度であった。これに対し、欧州の計画では、超々臨界圧発電(USC, Ultra Super Critical)で発電効率 η を45%に高め、更にA-USCで発電効率 η を50%に高めることで、2000年時の世界平均の二酸化炭素(CO₂)排出量より40%程度削減する方針を打ち立てていた。最終的には、CO₂回収および貯留技術(CCS, Carbon dioxide Capture and Storage)の実用化により石炭火力のゼロエミッションを達成する計画が立案されている。

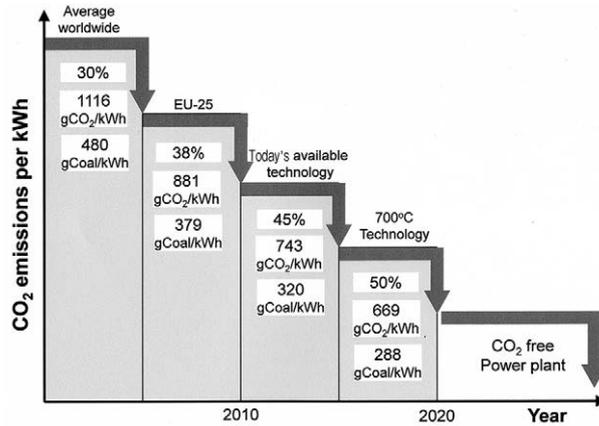


図1 欧州高効率石炭火力のロードマップ (3)

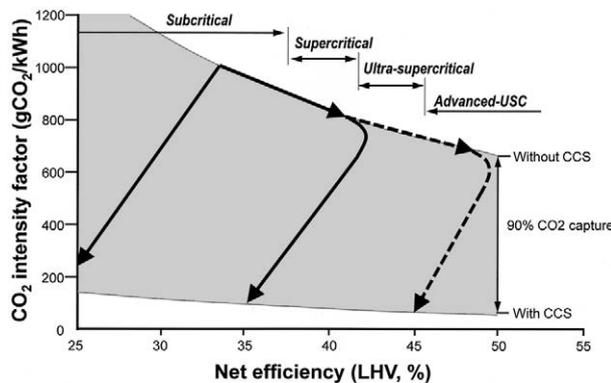


図2 CCS 利用によるプラント効率と CO2 排出量 (4)

ただし、CCS 適用においては、CO₂ の回収および貯留を行うために、ポンプや圧縮機を駆動する必要があり、プラントシステムの補機動力としての消費が従来電力よりも増えてしまう。図2に CCS 利用によるプラント効率の低下の予測図を示す⁽⁴⁾。現状の USC プラントに 90% の CO₂ を貯留する CCS を備えた場合、発電端効率が 45% 程度であっても送電端では 35% 程度になる。A-USC プラントに CCS を備えた場合は、発電端で 50% が送電端で 45% となるので、高効率化するほど CO₂ を回収すべき絶対量も減り、補機動力としての消費は低減できる。このように、600℃ から 100℃ 蒸気温度をあげた A-USC 開発は、高効率化による CO₂ 低減とともに、CCS 利用時の送電端効率の損失の阻止にも有効な手段である。

3. A-USC 開発課題

図3に各種材料のクリープ強度の概要を示す⁽⁵⁾。ボイラやタービン設計で必要とするクリープ強度は、概ね 10 万時間で 100MPa 程度といわれている。この設計ニーズによれば、高 Cr 鋼材料が適用できる限界は、600℃ 程度であって、それよりも高温になれば、オーステナイト系ステンレスか Ni 基合金を採用することになる。

Ni 基合金の実用化は、航空機のエンジンやガスタービンプレードの適用がある。しかしながら、従来実用化されている Ni 基合金素材の大きさは、高々数トン程度であって、ボイラの大径管や蒸気タービンロータのような数十トンの規模の製造実績は無い。また、Ni 基

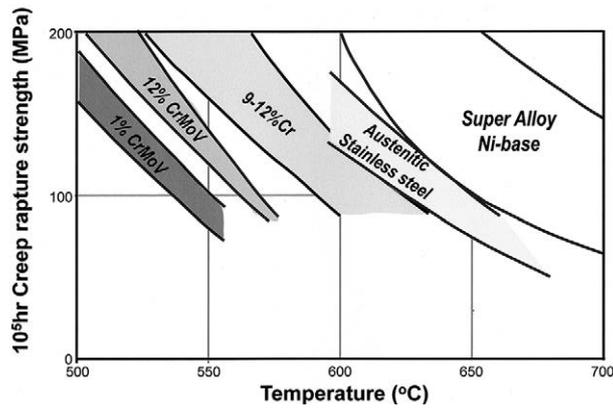


図3 各種材料のクリープ強度 (5)

合金の特性として、鍛造や鋳造の素材製造過程で、温度変化に対する組織変化の感度が高い。そのため、大型素材の製造ほど、表面と内部の温度勾配がつきやすくなるので、成分元素の濃度分布が不均一になる偏析を生じる問題がある。そのため、試験片レベルや小さな素材で如何に高い強度特性が得られても、大型素材全体にわたり設計者の目標を満足する強度を確保することが難しい。これら、製造メーカーの既存設備容量の限界と Ni 基合金の製造時の偏析問題から、A-USC の最も重要な開発課題は、ボイラや蒸気タービンに適用できる大型な Ni 基合金の開発にある。

また、Ni 基合金は、いわゆる希少金属であり素材価格は従来の高 Cr 鋼に比べてかなり高額であることが懸念される。そのため、ボ

イラ・タービンの設計では、700°Cの蒸気条件を維持し、かつ Ni 基合金の使用をなるべく抑えた構造設計の検討が重要となる。

4. 各国の開発状況

(1) 欧州

欧州では、1998年頃より、大学の材料開発研究機関、製造メーカー、電力会社等によって A-USC 開発計画に着手している (6)。開発にあたっては、最終的に 700°C 級実証機プラントの運開および商用機化を見据え、材料選定・検証、材料の実蒸気試験、プラント設計などを段階的に計画していた。図 4 に計画内容を示す。本開発は、電力会社の主動で行われ、欧州連合 (EU) 各国政府の支援も取り付け、産・官・学

Phase	Description	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
1A	Conceptual feasibility			■	■	■															
1B	Material property demonstration				■	■	■	■	■	■											
2A	Detail design of critical components for boiler and piping							■	■	■	■										
2B	In-plant demonstration of base materials for boiler and design							■	■	■	■	■									
2C	Turbine component prototype manufacture and test							■	■	■	■										
3A	Final large-loop demonstration/upscaling of critical components for boiler, turbine and piping									■	■	■	■	■							
3B	Create owner's consortium, Find location of plant. Establish tender documents, Investigate financing											■	■								
4	Procurement, construction and commissioning of demonstration plant													■	■	■	■				
5	Operational demonstration of first plant																	■	■	■	■
6	Feedback to partners																			■	■
Reviews					◆				◆												
Funding application		◆				◆		◆													

図4 欧州 A-USC 開発計画 (6)

の体制が整っていた。特筆すべきは、世界に先駆け、欧州電力会社大手 E.ON の商用機プラントによって 700℃ の蒸気を生成した実缶試験を 2005 年から 2009 年の間実施したことである⁽⁷⁾。ただし、当時は未だ Ni 基合金の大型製造に関する能力が習熟されていなかったことや、当時の欧州で石炭火力の新設が長年途絶えていたことにより、溶接技術などの施工経験不足などもあって、幾つか不具合が散見された。

一方、2010 年代に太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が一気に進み、電力会社は大量の再生可能エネルギーによる電力を買い取ることが強制された。このため、既設火力の運用縮小を余儀なくされ、電力経営は圧迫された。そのため、石炭火力の CO₂ 削減のために計画していた A-USC や CCS の開発資金繰りが難しくなり、具体的な開発は以前に比べてトーンダウンしている。計画当初は、50% 以上の効率を狙った A-USC 実証機計画を 2010 年代に着手する予定であったが、現在この実証機建設計画は途絶えている。

なお、実缶試験で生じた Alloy617 等の不具合要因は詳細に分析されており、あらためて改良を加えた材料開発が継続して行われている⁽⁸⁾。材料および製造メーカーにおいては、実用化に向けた開発が継続中である。

(2) 米国

シェールガスの実用化やオバマ政権による既設石炭火力への環境規制値に対する圧力⁽⁹⁾もあって、石炭火力の高効率技術である石炭ガス化複合発電 (IGCC) や A-USC 開発については、具体的な開発支援が見えない。一方、欧州が着手した 700℃ 開発に対抗して、米国エネルギー省は 2000 年代初頭より 1400°F (760℃) 級開発計画をかかげている⁽¹⁰⁾。現在は、米国電力研究所 (EPRI) 主体で材料要素開発が進行中である。EPRI によれば、近年、ボイラは Alstom, B&W などと、タービンは GE などのメーカーも開発体制に取り込み、1400°F 級の実缶試験および実蒸気によるタービン回転試験の計

画に着手したとのことである⁽¹¹⁾。米国の CO₂ 規制値は、2005 年比で 2030 年までに 30% の CO₂ 削減を義務付けることがあげられている。この規制値は、760℃ 級 A-USC 開発の最終目標としている元々計画していた CO₂ 規制値とほぼ同等であって、実は開発当初の狙いに沿ったものと思われる。米国の既設石炭火力による電力総容量は、中国に次いで多い。米国の電力を再生可能エネルギーと天然ガスだけの構成にいきなり変更することは、経済リスクが懸念され想像しがたい。米国は A-USC や IGCC による石炭火力の高効率化の恩恵を受ける最も大きい国の 1 つでもあり、Ni 基合金を製造する素材メーカーも多く抱えるので、開発資金援助が具体化すれば、一気に開発が進む技術的なポテンシャルは高いと思われる。

(3) 中国

世界で最も多くの石炭火力を運用しており、CO₂ 排出が著しい中国でも、A-USC 技術開発に着手している。しかし自国の独立した技術で、実際に新しい材料開発に着手した内容や製造メーカーによる要素技術開発の紹介は見られず、本分野の国際会議においても欧米の開発内容の踏襲のような発表が多かった。一方、本開発と並行して、欧州製造メーカーの ALSTOM や SIEMENS によって、中国の外高橋プラントをベースに将来の 700℃ 級開発をにらんだ 600℃ 級二段再熱の検討を行ったとの講演があった⁽¹²⁾。今後、具体的な中国の A-USC 技術開発に欧米製造メーカーが如何に関与していくのか興味深い。

(4) インド

2010 年にインドでも A-USC の実用化開発を行うことが発表された⁽¹³⁾。当初 2017 年には 800MW 規模の A-USC 実証機を建設する予定であり、開発体制は、インディラガンジー原子力研究センター (IGCAR)、バーラト重電機 (BHEL) そしてインド国営火力発電公社 (NTPC) で組織されている。しかし、インド

も中国同様、既に他国で公開された候補材料の試験に着手しはじめたばかりであり、自国での技術開発を実施している状況は見当たらない。実証機開発の計画は遅れるものと予想される。

5. 日本の開発経緯

現在、世界の石炭火力市場で日本が最も高効率なプラントを運用している。この理由は、1980年代に行った600℃級 USC の実用化開発が実を結び、約半分の商用プラントに USC 技術が適用されているためである。

この600℃級 USC プラントが実用化されていた2000年代前半には、次世代の高効率化技術として、石炭ガス化による新たなシステムを導入するIGCCの実証開発が進んでいた。一方、A-USC 開発は、システム的には単に高温化すれば良いものの、ボイラ・タービンの素材としてNi基合金のような新材料の適用検討が必要であり、材料技術開発の大きな壁があった。そのため、当時は材料開発者による基礎的研究が主体であった。

2000年代当初は、日本機械学会動力エネルギー部門の分科会「石炭利用発電の高効率化技術に関する調査研究」⁽¹⁴⁾等により、A-USC 技術開発の意見交換や技術情報収集を

していた。これら幾つかの委員会活動と並行して、各社独自の材料開発が行われた。これら開発は、のちに（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）や（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受け、実機大のモックアップ製造試作などを実施している⁽¹⁵⁾。また、2005年に（一財）エネルギー総合工学研究所（IAE）の自主研究として、「次世代超々臨界圧プラント A-USC 技術開発 経年石炭火力発電所の高効率化とそれに伴うCO₂排出削減研究」が行われた⁽¹⁶⁾。このような材料開発の基礎検討の具体化とプラント成立可能性の事前検討を経て、2008年より2016年の9年間、経済産業省による国プロ補助事業に認められ現在の開発に至る。

現在の国家プロジェクト（国プロ）体制は、IHI、東芝、富士電機、新日鐵住金、ABB日本ベーレ、岡野バルブ、東亜バルブ、三菱重工業および三菱日立パワーシステムズにより構成され、高効率発電システム研究所により、事業取り纏めが行われている⁽¹⁷⁾。図5に日本国プロの開発工程を示す。現在、要素技術開発をほぼ完了し、ボイラ実缶試験（含む一般弁および高温弁）およびタービン回転試験の準備を遂行している。次章ではタービン、ボイラに分けてこれまでの開発経緯概要を述べる。

年度		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
開発項目		(H20)	(H21)	(H22)	(H23)	(H24)	(H25)	(H26)	(H27)	(H28)	
システム設計、設計技術開発		基本設計、配置最適化、経済性試算									
要素開発	ボイラ	材料開発									
		大径管、伝熱管用新材料開発、材料改良									
		高温長期材料試験（3-7万時間）									
	タービン	材料製造性検証									
		溶接技術開発・政権、曲げ強度試験ほか									
		材料改良仕様策定等		実サイズ部材試作							
	高温弁	材料開発									
		ロータ、ケーシング等の大型溶接技術、試作									
	高温弁		構造・要素・材料開発								
			試設計		試作						
実缶試験・回転試験				設備計画	設備設計	設備製造、据付	試験、評価				

図5 日本の A-USC 国プロ開発工程⁽¹⁷⁾

6. 要素技術開発状況

(1) タービン

タービン開発では、材料、システム、構造配置、製造加工そして保守管理に関わる各種要素技術開発が必要である。特に、ロータおよびケーシングには、Ni 基合金の大型部材を適用することとなる。先に述べたとおり、Ni 基合金の大型化は難しいため、Ni 基合金同士、あるいは異材との溶接技術も重要となる。そのため、設計、加工、検査の観点でより扱いやすい Ni 基合金の選定や新材料開発が必要になる。表 1 に弊社で開発してきた材料の特徴を示す^{(18)～(21)}。

これらの材料は、国プロ開発の目標であった、10万時間 100MPa 以上の高温クリープ強度が達成される見込みであり、10 トン級の大型鍛造ロータの試作に成功している。一方、Ni 基合金は従来のロータ材に適用してきた高 Cr 鋼に比べて超音波透過性が劣る問題があ

る。この理由は、Ni 基合金は強度が高い反面、鍛造時の抵抗力も大きいので鍛造しにくく、素材の結晶粒を微細かつ均質にすることが難しいためである。そのため、鍛造プロセスでは、従来以上にきめ細かい配慮が必要になり、複数の試作を繰り返し行い検討した。現状では、φ 1000 程度の大型ロータ素材において、非破壊検査による最小検出欠陥寸法が 2mm 程度以下にできる見通しが得られている。

図 6 に LTES700R と高 Cr 鋼の異材溶接例を示す⁽¹⁹⁾。溶接ロータについては、既に高 Cr 鋼において技術確立がされており実績十分な TIG 溶接を採用した。なお、溶接部継手強度は、母材同等となることも確認している。

ケーシング材料は、開発を加速するため欧州候補材である Alloy617, Alloy625, Alloy740 について、タービンメーカ各社で分担して材料評価試験を実施し、実機適用の可能性を評価した。これら結果に基づき、高温弁やノズルボックスなどの実機大の試作を

表 1 開発評価中の新 Ni 基合金材料

材料名	C	Ni	Cr	Mo	Co	W	Nb	Al	Ti	Fe
FENIX700	0.01	42	16	-	-	-	2	1.3	1.7	Bal.
	鉄-Ni基合金であり、素材価格が一般的Ni基合金の2/3程度。大型鍛造の製造性に優れている。ロータ候補材									
LTES700R	0.03	Bal.	12	6.2	-	7	-	1.65	0.65	-
	Ni基合金であるが、線膨張係数は高Cr鋼と同程度に抑えている。溶接施工性に優れる。ロータ候補材。									
USC141	0.03	Bal.	20	10	-	-	-	1.2	1.6	-
	700°C、10万時間で180MPa程度の高温クリープ強度を持つ。タービン翼材、ボルト材、ボイラ伝熱管候補材。									
USC800	0.04	Bal.	17	6	23	2	-	4	-	-
	Ni基合金の高強度化と熱間鍛造性を両立した材料。700°C、10万時間で270MPa程度の高温クリープ強度を持つ。タービン翼材、ボルト材、ボイラ伝熱管、大径管候補材。									

(数値は各化学成分の重量%)



図 6 LTES700R と高 Cr 鋼（先進 12%Cr 鋼）の溶接施工例

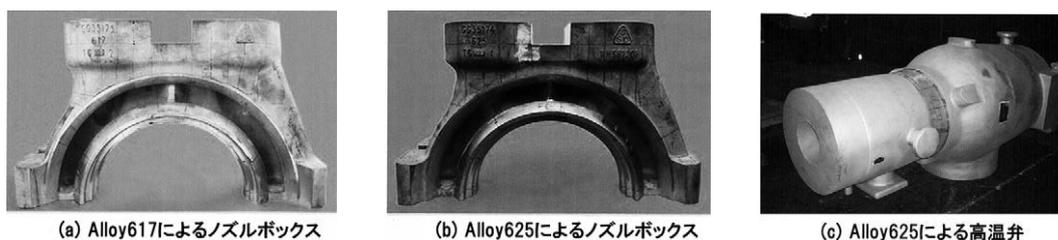


図7 各種ケーシング施工例⁽²²⁾

行った。それらを図7に示す。現状製造性の良さから Alloy625 や Alloy617 の実用化が考えられる。

タービンロータの製作施工事例を図8に示す。Ni 基合金は硬く粘り性を持つ難削材であり、かつ熱伝導率が低く切削熱が切削の1カ所に集中するため、工具損傷が部分的に著しく早く発生する問題があった。施工当初は、工具チップの選定や切削油の管理などに苦労した。現在は、これらの課題をクリアし、従来の製造と同様の加工精度が得られ、タービン翼の組立も完成している。



図8 Ni 基合金によるタービンロータ製造例

(2) ボイラ

A-USC 開発では、温度が 100℃ 上がることで、流体温度とガス温度との温度差が小さくなるので、伝熱面積を従来よりも増加した設計を検討する必要がある。また高温化に適した Ni 基合金などの材料の選定にあたり、従来材料に比べて線膨張係数が大きく熱伝達率が小さいことにより、配管熱伸びや配管肉厚方向の温度差による熱応力が発生しやすくなる点も考慮しなければならない。また、過熱器および再熱器の伝熱管では高温腐食、水蒸気酸化の環境が厳しくなるので、それらの性質を良く評価しておく必要がある。一方、新材料の実用化にあたっては、高温クリープ強度のみならず、長時間使用に伴う脆化や熱間加工性、溶接性など施工性について検討しなければならない。

このような設計および製造面の課題を鑑み、A-USC ボイラ開発の候補材料として表2に示すものを選定した⁽¹⁷⁾。各種候補材は、将来の実用化を見据えて健全性を確実に評価する

表2 700℃級ボイラ候補材料⁽¹⁷⁾

材料呼称		組成	厚肉大径管	小径管
HR6W	Fe-Ni基	45Ni-23Cr-7W	主蒸気管 高温再熱蒸気管 高温部管寄せ 高温部連絡管	高温部伝熱管
HR35	Ni基	50Ni-30Cr-4W-Ti		
Alloy617	Ni基	Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al		
Alloy263	Ni基	Ni-20Cr-20Co-6Mo-Ti-Al		
Alloy740	Ni基	Ni-25Cr-20Co-2Nb-Ti-Al		
Alloy141	Ni基	Ni-20Cr-10Mo-Ti-Al		
高B-9Cr鋼	フェライト鋼	9Cr-3W-3Co-Nb-V-B	管寄せ及び連絡管 (約650℃まで)	伝熱管 (従来高Cr鋼と同程度の温度領域)
低C-9Cr鋼	フェライト鋼	0.035C-9Cr-2.4W-1.8Co-Nb-V		
SAVE12AD	フェライト鋼	9Cr-3W-2.6Co-Nb-V-B		

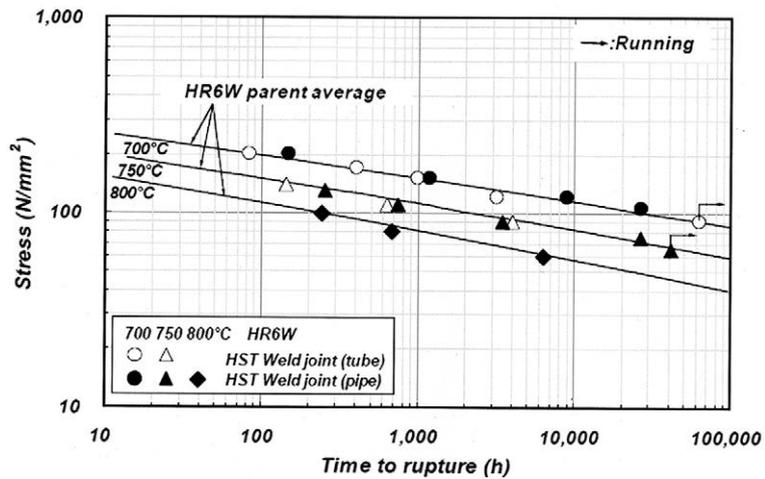


図9 HR6Wによる継手部クリープ強度の計測結果⁽²³⁾

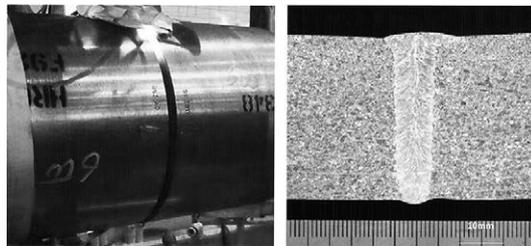
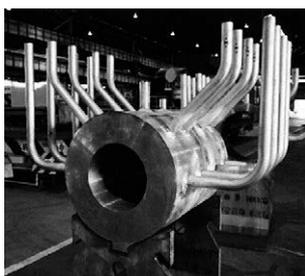


図10 大径管 (HR6W) の溶接施工例

ため、クリープ強度評価は10万時間の実測を課している。この中で、HR6Wの溶接継手部の長時間クリープ強度の計測例を図9に示す⁽²³⁾。現在、700°C下の継手で7万時間、750°C下の継手で5万時間破断することなく継続しており、計測途中でクリープ強度が大きく変化することはない。現状の途中経過を見る限りでは、目標通りの強度が得られる見通しである。また、紙面の都合で割愛するが、各種候補材料について、水蒸気酸化特性⁽²⁴⁾や石炭灰による高温腐食特性⁽²⁵⁾なども実用化に向けて詳細な実験を行い評価している。

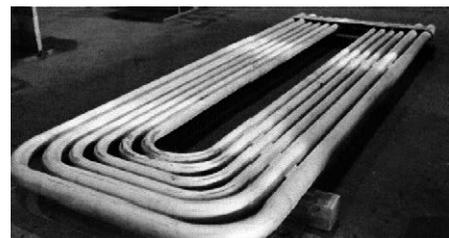
図10にHR6Wの大径管の溶接施工例を示す。本例では、狭開先HST (Hotwire Switching Tig) 溶接を用いており、幅約10mmの狭開先で欠陥のない健全な溶接部が得られている。また、実機製造に向けたモックアップ試作例として、図11に過熱器、再熱器の管寄せ部、および過熱器管群を示す⁽²⁶⁾。このような複雑な形状における施工性も十分に確認されており、今後は欧州で試験したような700°Cの実蒸気に曝した試験を行い、新素材および溶接部などの健全性を確認する予定である。



(a) Superheater header



(b) Reheater header



(c) Tube element

図11 実機大ボイラ各種部品製造事例⁽²⁷⁾

7. おわりに

現在日本の要素技術開発は計画通りに進み、ボイラ実缶試験及びタービン回転試験に向けた製造が行われている。ボイラ実缶試験は、欧州と同様商用プラントを改造し、過熱器により700℃の蒸気を生成し、各種構造に1万時間ほど曝すものである。タービン回転試験は、ヒータの放射熱により700℃以上の温度場を模擬し、実機大の動翼を伴うタービンロータを3600rpmの定格回転で数千時間連続試験する。これら試験によって、実機製造性の確認のみならず、高温試験を経た後の各種部材の寿命評価をはじめとした材料特性を評価し信頼性を検証する。これら試験が順調に成功し、結果に問題なければ、A-USC開発の実用化が具体的に見えてくると考えられる。USCの実用化が日本で確立したことと同様、A-USCの実用化も世界に先駆けて日本で成功し、広く世界に貢献していきたいと考える。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁, エネルギー基本計画 (2014)
- (2) 経済産業省, Cool Earth- エネルギー革新技術計画, (2008)
- (3) VGB Power Tech, Facts and Figures 2010/2011 Electricity Generation (2011)
- (4) IEA, Technology Roadmap (2012)
- (5) T. U. Kern, et al., Material and Design Solutions for Advanced Steam Power Plants, 4th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2004)
- (6) S. Kjaer, et al., The Advanced Supercritical 700°C Pulverized Coal-fired Power Plant, Power gen Europe (2001)
- (7) H. Tschaffon, 700 oC Power Plant Technology –Status and Challenge, 9th Liege Conf. (2010)
- (8) A. D. Gianfrancesco, An European Approach to 700 oC Power Plant, Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, EPRI (2014)
- (9) <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/05/31/weekly-address-reducing-carbon-pollution-our-power-plants>
- (10) R. Viswanathan and J. Shingledecker, Evaluating Materials Technology for Advanced Ultra Supercritical Coal Fired Plants, Power (2010)
- (11) J. Shingledecker, et. al, Current Status of the US DOE/OCDO A-USC Materials Technology R&D Program, 7th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013)
- (12) J. Mao, W. Feng, Ways to Further Improve Efficiency for Ultra-supercritical Coal-fired Power Plants in China, IEA CCC Workshop on Advanced USC Coal-fired Power Plants (2012)
- (13) Government of India Ministry of Power, Report of the Working Group on Power for Twelfth Plan (2012)
- (14) 日本機械学会, 石炭利用発電の高効率化技術に関する調査研究分科会成果報告書, P-SCD338 (2004)
- (15) 日本機械学会, 700℃級超々臨界圧 (A-USC) 発電技術に関する調査研究分科会成果報告書, P-SCD353 (2007)
- (16) エネルギー総合工学研究所, 700℃級超々臨界圧プラント (A-USC) 技術開発 経年石炭火力発電所の高効率化とそれに伴うCO2排出研究報告書 IAE-052010 (2006)
- (17) 福田雅文, ‘シェール革命と日本の電力エネルギーの将来展望’のうち「A-USC」, 火原協協会誌 10月号 (2014)
- (18) S. Imano, et. al., Mechanical Properties and Manufacturability of Ni-Fe base Superalloy (FENIX-700) for A-USC Steam Turbine Rotor Large Forgings, 5th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2007)
- (19) R. Yamamoto, et. al., Development and Trial Manufacturing of Ni-based Superalloy ‘LTES700R’ for Advanced 700C Class Steam Turbines, 7th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013)
- (20) T. Ohno, et. al., Development of Low Thermal Expansion Ni base Superalloy for Steam Turbine Applications, 6th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2010)
- (21) S. Imano, et. al., Development and Trial Manufacturing of Ni base Alloys for Coal Fired Power Plant with Temperature Capability 800oC, 7th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013)
- (22) Y. Hirakawa, et. al., Trial Production of Alloy 625 and Alloy 617 Casting Component for advanced 700C Class Steam Turbines, 7th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013)
- (23) T. Tokairin, et. al., Verification of Practical Applicability of 45Ni-23Cr-7W Alloy to Thick-Walled Component for A-USC Boilers, 3rd Int. ECCO Conf. (2014)
- (24) Y. Fukuda, Ultra Supercritical Power Plants in Japan – Materials and High Temperature Corrosion Properties, Int. Sympo. on High Temperature Oxidation and Corrosion (2010)
- (25) Y. Tanaka, et. al., Hot Corrosion Properties of Ni-based Alloys Used in an Advanced-USC Boiler, 7th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013)
- (26) N. Saito, et. al., Fabrication Trials of Ni-based Alloys for Advanced USC Boiler Application, 7th Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013)

[寄稿]

バイオマス専用粉砕方式による既設微粉炭焼きボイラでの
混焼技術の実用化開発（混焼率増大技術の開発）

金本 浩明（バブコック日立㈱ 呉事業所
呉ボイラ技術部 主管技師）



1. 背景と目的

地球温暖化の対策として、主要因とされる二酸化炭素（CO₂）の排出を抑えようとする動きが世界各国で加速している。国内においては、1990年をベースとしてCO₂排出量を25%削減することが公表された。本共同研究を開始した2010年には、国内の状況は景気が後退する傾向にあったものの電力業界での総発電量は依然として高いレベルにあった。その後、東日本大震災が発生する以前には発電の中で原子力の占める割合が高かったが、石炭やガスによる火力発電の割合も大きく発電時のCO₂排出抑制が望まれる状況にあった。大震災以降は電力不足への対応策として新規火力発電プラント計画の動きが活発となりCO₂排出抑制の必然性はそれまで以上に高まった。その結果、抑制手段として高い混焼率のバイオマス燃焼がさらに有力となった。

これまでに、CO₂排出抑制の課題に対応すべく2001年度から2003年度にかけて中国電力、日立製作所、およびバブコック日立は共同で（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究「石炭焼きボイラにおけるバイオマス混焼技術の開発」を実施してきた。この委託研究では、日本国内の木質バイオマスを収集し石炭焼きボイラに燃料として供給可能とする基礎技術を開発し国内の実稼動中のボイラに適用の見通しを得た。

この頃から国内の電力会社ではバイオマス混焼の実証試験を始めた。国内数社の電力会

社で実施されたバイオマス混焼では、石炭供給ラインにバイオマスを混載させ石炭粉砕用ミルでバイオマスを同時に混合粉砕させ火炉内で燃焼させる方式が採用されている。この方式の特徴は既設の設備改造範囲が少なく改造コストを抑えることができることであるが、石炭と同時にバイオマスをミルに供給すると粉砕する負荷がかかり微粉炭の粒度が粗くなるためにバイオマス混焼率は熱量ベースにて2～3%（cal%）が限界となる。

CO₂排出量25%削減を達成するためには、CO₂排出量の大きな石炭焼きボイラでバイオマス混焼率を大きくする事が一案として挙げられる。既設の石炭焼きボイラで大量のバイオマスを粉砕するためには、図1に示すようにバイオマス粉砕ミルを別置する必要があるが、追加設備となるため所内動力の増加および既設設備内への設置スペースの確保が困難といった課題がある。そこで、提案方式は電力会社が導入しやすいようにバイオマスの粉砕と燃焼に係る追設設備を極力少なくして改造コストを抑え、かつ高いバイオマス混焼率を達成することを開発条件とした。既設設備を活用する手法として予備ミルをバイオマス専用ミルに転用したシステムを構築することとした。国内の石炭焼きボイラでは石炭粉砕用ミルは複数台設置されており、通常は予備機として1台待機させている。本開発では、その石炭ミルをバイオマス専用ミルに転用させミル運用を考慮することで追設する設備を極力少なくして改造コストを抑え高いバイオマ

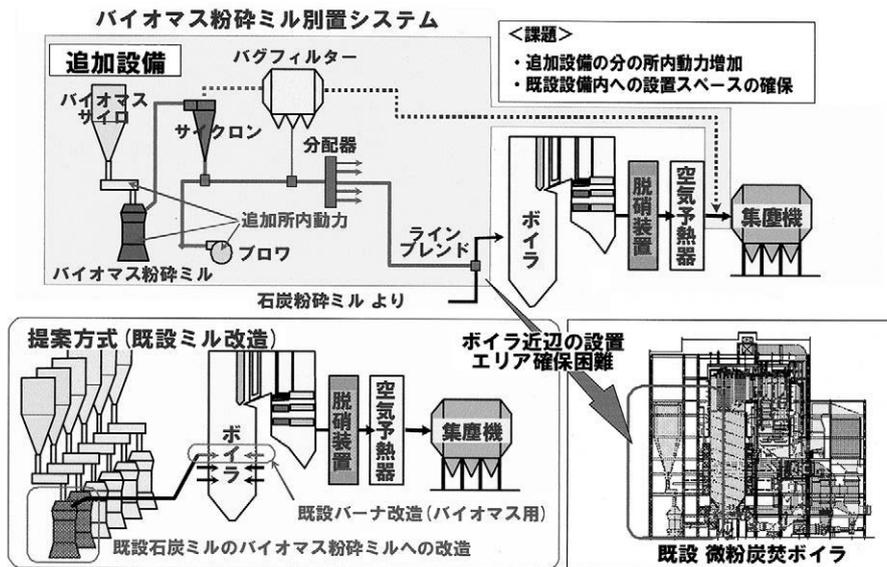


図1 提案方式（既設ミル改造）と従来方式（ミル別置システム）の比較

ス混焼率（目標：25cal%）を達成させる燃焼システムの実用化開発を目的とした。

なお、この成果は、2010年度から2013年度に行ったNEDOとバブコック日立(株)との共同研究業務「バイオマス専用粉碎方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」の結果得られたものである。

2. 開発の特徴と目標値

表1に専用粉碎および混合粉碎の両方式について、現状、本開発ミルの特徴、および目標値を示す。

国内石炭火力における現状の混焼率は専用粉碎で15cal%、混合粉碎で3cal%程度である。専用粉碎方式では新設の別置ミルを用いているので、石炭ミルとの共有ができないことや所内動力の増加が大きいなどの課題を有している。本開発の専用粉碎ミルは、新たなミル増設が不要で石炭ミルへの復旧が可能な点に特徴があり、バイオマスを従来のチップからペレットに特化することで動力の増加を抑えることが可能となる。具体的には、専用粉碎方式のみで20cal%の混焼率を得ることを開発目標とした。

一方、混合粉碎方式では現状の限界混焼率（3cal%程度）はミル動力やミル差圧が制限に

表1 専用粉碎と混合粉碎の現状と本開発ミルの特徴

	A 専用粉碎	B 混合粉碎
現状混焼率(国内)	15cal%程度	3 cal%程度
問題点	1) 新設別置ミルが必要 2) 石炭との共用不可 3) 所内動力増加	1) 動力もしくはミル差圧の増加
本開発ミルの特徴	1) 既設ミル改造 2) 石炭ミルへの復旧可能 3) ペレット特化とミル内部構造の変更により処理能力増加	1) ミル内部構造の変更による動力低減
動力目標値	石炭ベースの20%増程度	同左
バイオマス種類	スイッチグラス、ミスカンザス竹、バガス、パーク木質系 ^{※3} (ペレット) ^{※1}	林地残材(チップ)
ミル別混焼率目標値	20cal%(2台専用粉碎ミル)	5 cal%(4台 ^{※4} 混合粉碎ミル)
ボイラ混焼率	25cal%	

※1: ペレット種類は採用候補材 ※2: ミル設置台数/缶=6台の場合 ※3: 平成24年度の木質系を追加

なる場合が多い。本開発の混合粉碎ミルは石炭用としてミル内部流動の適正化を図りミルレース上における過剰粉碎を抑える機能を有している。混合粉碎ミルとしても動力および差圧の低減が見込める。具体的には5 cal%の混合粉碎を得ることを開発目標とした。

以上のとおり混焼率 25cal%の内訳は、バイオマスペレットを専用粉碎で20cal%、さらに林地残材を混合粉碎で5 cal%とする。専用粉碎、混合粉碎共にミル内部構造の適正化によって従来より動力の増加を抑制できるが混焼率増加に伴う動力増加は避けられないので、ミ

ル摩耗による経時的な動力増加分とボイラ負荷変化時の給炭量の過渡的増加分（オーバーシュート分）を考慮して、代表石炭ベースより約20%の増加までを許容することを開発目標値として掲げた。

3. 開発の対象部位

本共同研究の概要を図2に示す。既設の石炭焚ボイラにて、バイオマス混焼率25cal%を目標に下記の項目についての実用化開発を実施した。

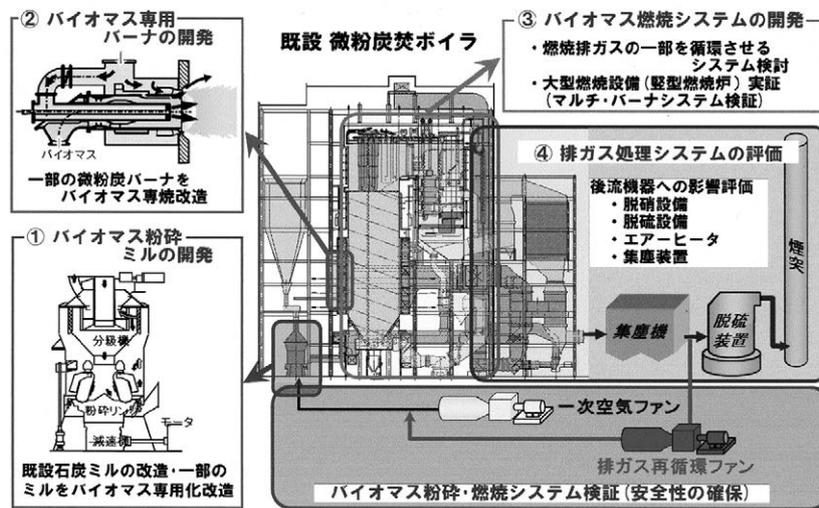


図2 燃焼システムの実用化開発内容

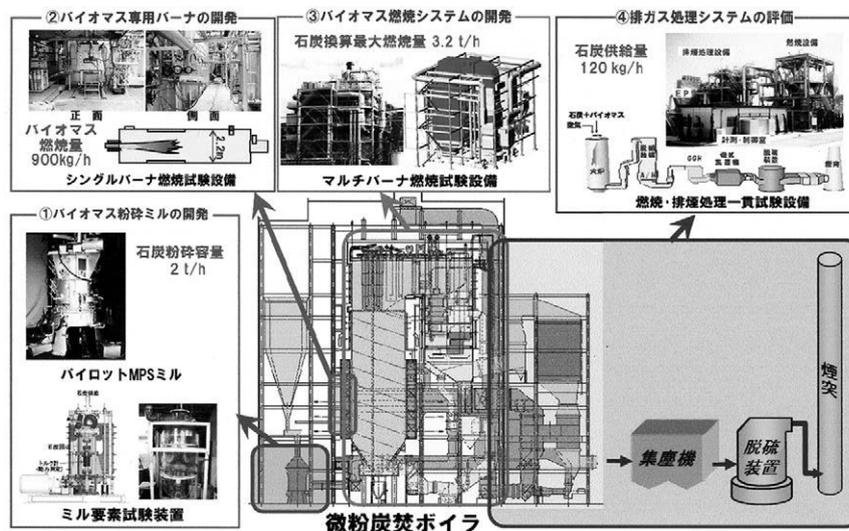


図3 主な試験設備

- ①バイオマス粉碎ミルの開発
- ②バイオマス専用バーナの開発
- ③バイオマス燃焼システムの開発
- ④排ガス処理システムの評価
- ⑤実機ボイラ性能予測とシステムの成立性検討

4. 試験設備

図3に本共同研究に使用した主な試験設備(①ミル, ②バーナ, ③燃焼システム, ④排ガス処理システム)を示す。

5. 供試試料

表2に供試燃料の性状を示す。ミル開発が中核になるので、要素試験では予め6種類のバイオマスペレットと林地残材チップ1種について検討した。それ以外の試験ではバイオマス種を絞り込んだ。パイロット規模試験のうちミルとマルチバーナ炉については、窒素(N)分が多く燃焼時の窒素酸化物(NOx)が懸念された草本系のスイッチグラスペレット、

代表的でポピュラーな木質系の松ペレット、および林地残材の杉チップの計3種を試験評価し、シングルバーナ炉と燃焼・排煙処理一貫処理設備については、スイッチグラスペレット、および木質(松)ペレットの計2種を試験評価した。松については震災後の国内での急激な増産を想定し木質系が対応可能なことからその重要性を考慮し追加したものである。林地残材は混合粉碎用であり燃焼性能への影響は少ないと考えシングルバーナ炉での試験ではスイッチグラスと松のみとした。また、燃焼・排煙処理一貫処理設備での試験も原料性状の検討範囲をより広く考慮する観点からスイッチグラスと松のみとした。

ペレットは発熱量が約17MJ/kg～19MJ/kgと一般的な瀝青炭(バルガ炭;27MJ/kg)と比べて低く到着時の水分は7～13%であった。揮発分の割合は約80%と一般的な瀝青炭(約30%)と比べ高い値を示した。杉チップはペレットと比べ全水分が約50%と高く発熱量は約10MJ/kgと低い特徴がある。混砕対象には上述のバルガ炭を用いた。

表2 供給燃料の性状

	ペレット						杉チップ (林地残材)	石炭 (バルガ炭)	
	木質 (松)	スイッチ グラス	ミスカンサス	パーク (樹皮)	バガス (サトウキビ)	竹			
入手元	カナダ	カナダ	カナダ	日本	ベトナム	日本	日本	臺灣	
高位発熱量(ar) [kJ/kg]	19,080	17,630	18,550	17,500	17,060	18,490	9,640	27,270	
低位発熱量(ar) [kJ/kg]	17,650	16,230	17,190	16,110	15,640	17,030	7,820	26,090	
全水分(ar) [%]	7.31	11.9	6.62	12.6	12.4	7.60	48.5	8.21	
工業分析	気乾水分(ad) [%]	6.87	6.77	5.20	12.42	11.21	8.27	11.13	2.49
	揮発分(dry) [%]	84.94	80.83	80.13	73.62	79.76	80.20	73.06	32.82
	固定炭素(dry) [%]	14.73	14.82	17.18	23.01	15.67	17.87	17.03	53.58
	灰分(dry) [%]	0.33	4.35	2.69	3.37	4.57	1.93	9.91	13.60
元素分析	C (dry) [%]	51.00	46.58	48.50	50.94	48.89	49.79	46.31	72.1
	H (dry) [%]	5.97	5.82	5.74	5.44	5.59	6.07	5.24	4.68
	O (dry) [%]	42.56	41.60	42.54	39.66	40.51	41.68	37.93	7.58
	N (dry) [%]	0.14	1.54	0.42	0.56	0.41	0.40	0.57	1.62
	S (dry) [%]	0.01	0.11	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.45
	Cl (dry) [mg/kg]	100	330	790	100	100	1100	300	220
真比重 [-]	1.47	1.49	1.48	1.52	1.52	1.48	1.48	1.5	
備考							石炭混砕用	参考データ	

ar: 到着ベース, ad: 気乾ベース, dry: 無水ベース

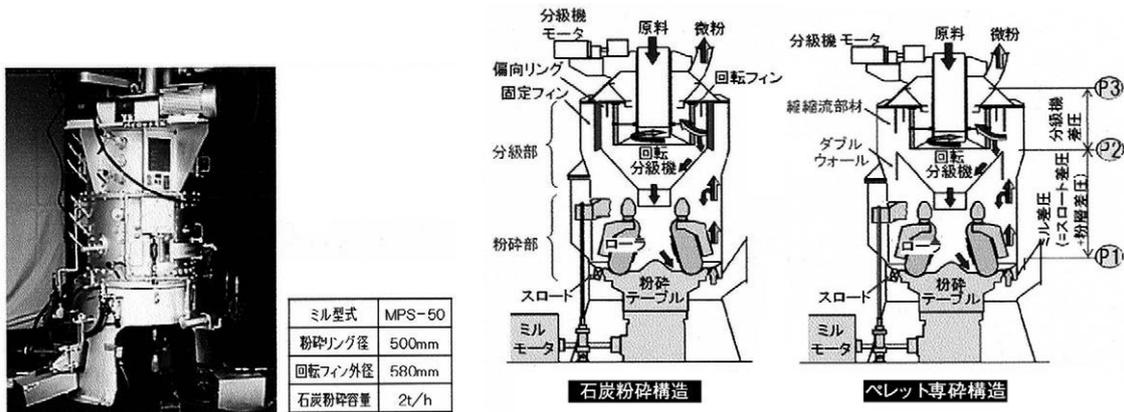
6. バイオマス粉砕ミルの開発

(1) 専用粉砕ミル

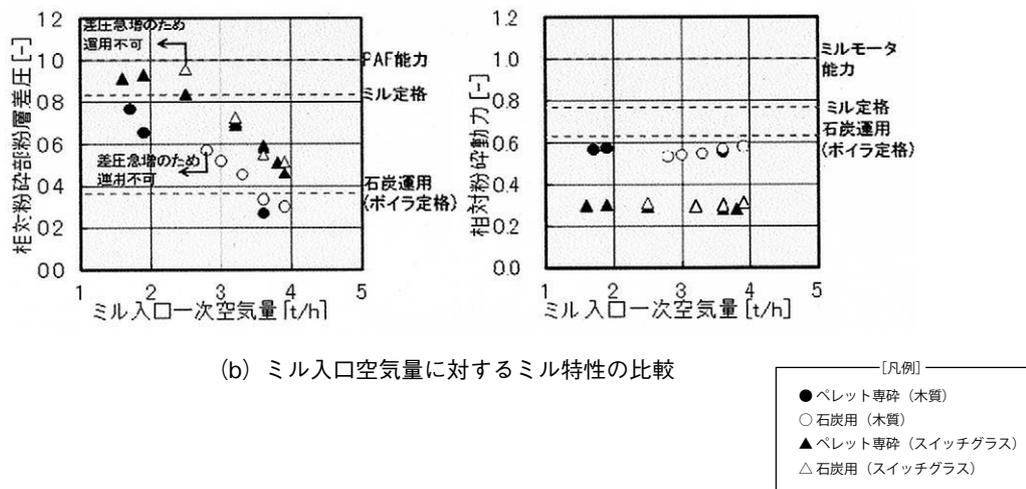
目標バイオマス混焼率 25cal% のうち 20cal% をミル 2 台によって受け持たせペレットに特化して専用粉砕を可能とするミルの開発を目的として、ミル構造の適正化および各種ペレット粉砕時の性能評価を行った。専用

粉砕時の課題は排出不良による差圧と動力の増加である。その対策として一次、二次分級部の流速を上げ分級粒径を増大させる新型構造 (図 4 (a); ダブルウォール, および縮流部材の組み合わせ) を供した。パイロットミル試験の結果, 図 4 (b) および (c) に示す特性となり次の知見を得た。

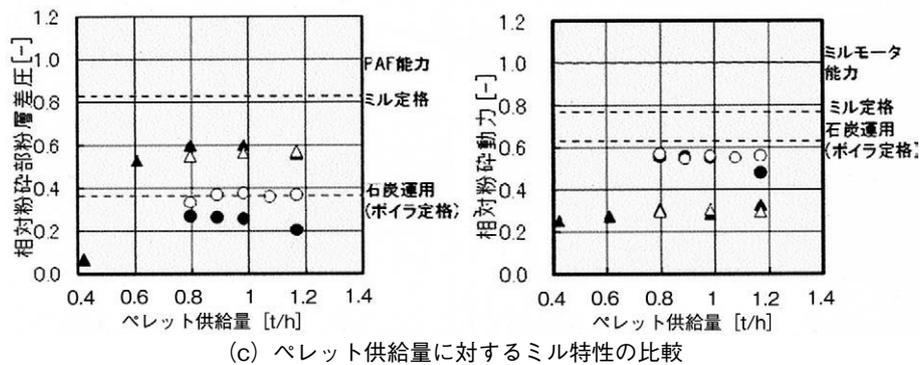
一次分級と二次分級を抑制した新型構造を



(a) パイロットミル外観および仕様



(b) ミル入口空気量に対するミル特性の比較



(c) ペレット供給量に対するミル特性の比較

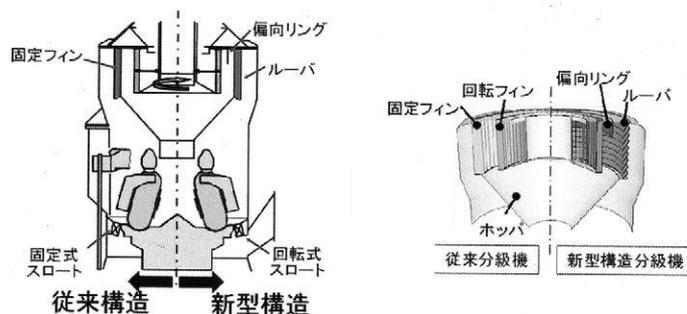
図 4 パイロットミルによる専用粉砕ミルの特性評価 (出所: AC 研)

用いることで、実機を模擬した様々な条件（一次空気量とペレット供給量を変化）で安定して運用できることが分かった。木質(松)ペレット粉碎時には、粉碎部粉層差圧および粉碎動力とも試験条件の範囲においてミル定格値に収まることが分かった。また、スイッチグラスペレット粉碎時には、粉碎部粉層差圧がミル定格値をやや超える場合があったものの、搬送空気昇圧ファン（PAF）の能力範囲内であることが分かった。その際の粉碎動力はミル定格値に収まること分かった。パイロットミルから得られた特性を基に実機のミル特性を評価した結果、スイッチグラスおよび木質（松）ペレットとも混焼率 20cal%（10cal%/ミル×2ミル）の運用が可能である見通しを得た。さらに、25cal%（12.5cal%/ミル×2ミル）についてもミル定格値範囲内で運用可能である見通しを得た。

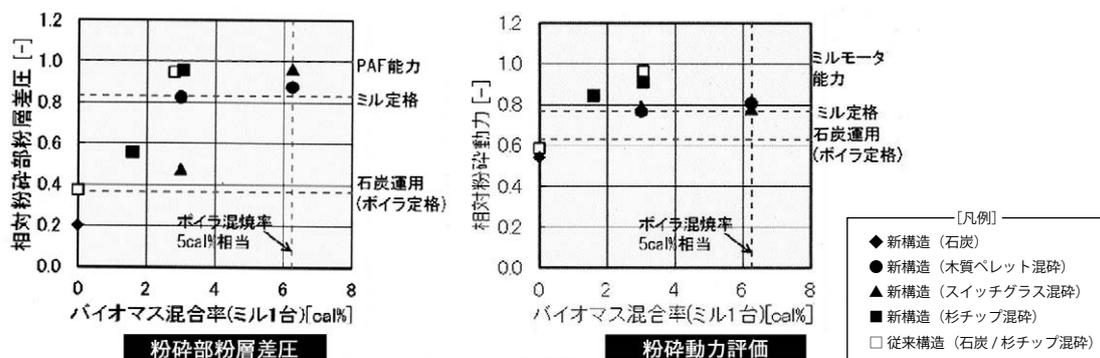
(2) 混合粉碎ミル

石炭とバイオマスの混合粉碎では現有技術において混砕率 3cal%（ミル単体）の実績がある。ここでは更なる混砕率の増加が可能かどうかを検討することを目的（ボイラでの混焼率目標 5cal%）とした。混砕率増大時の課題は差圧と動力の増加である。その対策として石炭専用粉碎の際に動力・差圧低減に効果のある新型構造（図5（a）；偏向リング、ルーバ、および回転式スロートの組み合わせ）を供した。その結果、図5（b）に示す特性となり次の知見を得た。

事前に行ったバッチ式ローラミルによる評価（粉碎部みの評価）ではスイッチグラスペレット混合粉碎時の動力が最も低く杉チップ混合粉碎時の動力が最も高いことが分かった。また、粉碎後の粒度はバイオマス混合率の増加に伴い低下する傾向があることが分かった。



(a) パイロットミル試験構造



(b) バイオマス混合率がミル粉碎特性に及ぼす影響

図5 パイロットミルによる混合粉碎ミルの特性評価

バイオマス種に関しては、パイロットミル（粉砕部と分級部を組み合わせた連続式ミル）による評価の結果、石炭へのバイオマス混合率の増加に伴い動力・差圧は増加傾向にあるが、杉チップ混合粉砕の場合と比較してペレット混合粉砕の場合には差圧および動力とも低い傾向にあることが分かった。

ミル構造に関しては、石炭と杉チップ、あるいはペレット（木質（松）、スイッチグラス）との混合粉砕の結果、新型構造の石炭用ミル（図5（a）；ルーバ、偏向リング付きの新型構造回転分級機を内蔵）は従来構造の石炭用ミルよりも、差圧・動力が低減する傾向を示した。しかし、バイオマスが杉チップの場合は差圧増加が大きく混合粉砕の上限は3cal%（ミル単体；ボイラでの混焼率2.4cal%）に留まった。一方、木質（松）ペレット、あるいはスイッチグラスペレットの場合は6.25cal%（ミル単体；ボイラでの混焼率5cal%）を設備能力範囲内で達成することが可能である見通しを得た。実機のミル特性も同様の見通しである。

7. バイオマス専用バーナの開発

微粉炭焼きボイラにおいて、20cal%のバイオマスペレットを専用に燃焼するバーナを開発するためにシングルバーナ試験を実施し

た。また、バイオマス専用バーナのバイオマス粉じん爆発に対する安全性確保のため粉じん爆発試験を実施しバイオマスの爆発性を評価した。専焼時の課題は、爆発防止対策として一次空気系の酸素濃度を排ガス混合により低減していること、および粒子が石炭に比べ粗ことによる着火性低下への対応である。対策として低酸素かつ粗粒で燃焼する褐炭用のNR-LEバーナ（図6（a）と（b）；バーナの特徴は保炎器と追加空気ノズル）を供した。試験の結果、図6（c）～（f）に示す特性となり以下の知見を得た。

- (1) バイオマス燃焼時の一次ガス中酸素濃度を石炭とバイオマスの粉じん爆発強度が同等になる酸素濃度まで低減しても安定燃焼が可能であった。
- (2) バイオマスは燃料中窒素分が石炭と同等以下のため、燃焼時のNO_xも石炭と同等以下であった。
- (3) バイオマスは高揮発分のため燃え切り性が高く、燃焼時のCOは石炭と同様に低くなった。
- (4) バイオマスは低灰分のため燃焼時の灰中未燃分は石炭より高いが、高揮発分のため燃え切り性が高く燃焼効率率は石炭と同等以上であった。

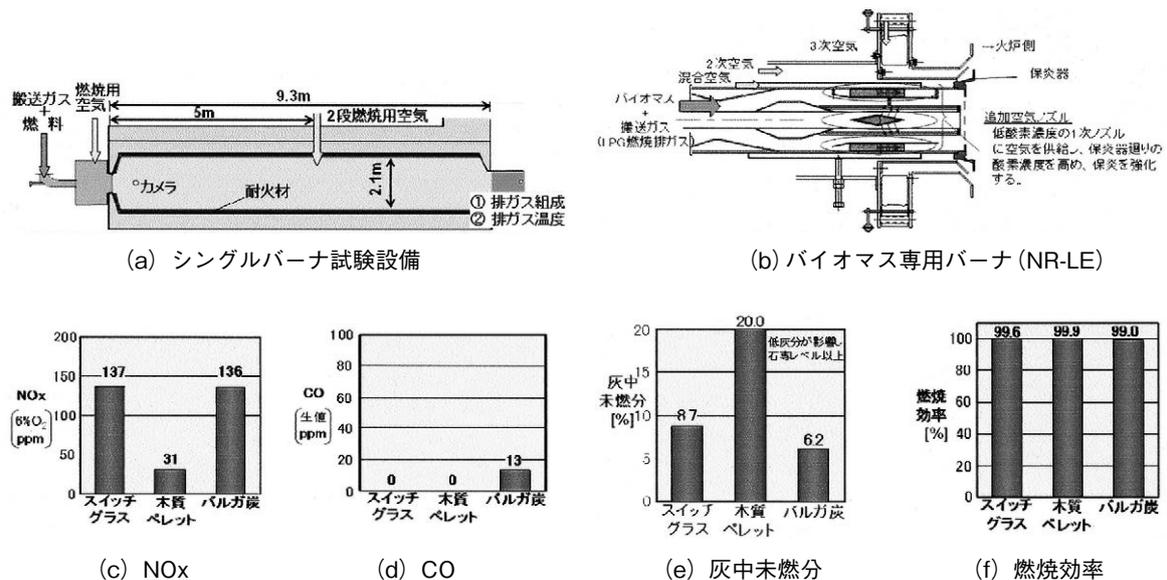


図6 全蒸気取り出しガスエンジンシステム概念図

8. バイオマス燃焼システムの開発

バイオマス専用バーナの開発成果であるバーナ（褐炭用 NR-LE バーナの改良型）と従来の石炭・バイオマス混合燃焼バーナ（NR-3 バーナ）とを図7 (a) に示すように組み合わせてボイラでのバイオマス混焼率 25cal% を達成する燃焼システムを開発した。マルチバーナ試験炉を用いた実機ボイラの模擬試験の結果、図7 (b) ~ (d) の特性となり以下の知見を得た。

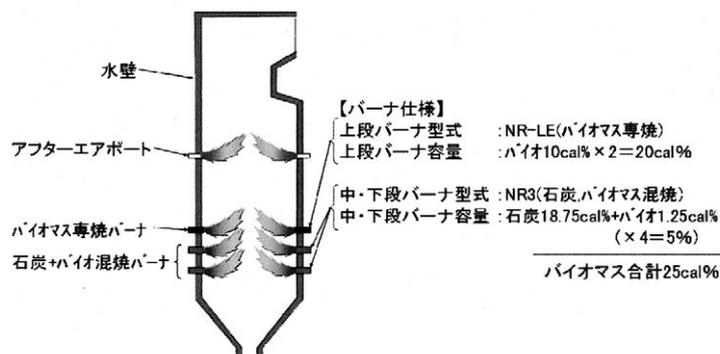
- (1) 周囲のバーナの影響を受けるマルチバーナ炉ではバイオマスバーナの一次ガス酸素濃度を爆発下限以下としても安定燃焼可能であった。
- (2) N分が低いバイオマスの混焼では石炭専焼よりも NO_x が低減した。また、木質（松）混焼の場合はスイッチグラス混焼と比較するとN分が低いので NO_x が低減した。
- (3) 高揮発分のバイオマス混焼では石炭専焼と同様に CO が十分低かった。

- (4) 低灰分のバイオマス混焼では石炭専焼よりも灰中未燃分が増加した。木質（松）ペレット混焼時の方がスイッチグラスペレット混焼時よりも灰中未燃分が少なくなった。

9. 排ガス処理システムの評価

石炭燃焼設備でバイオマスを混焼した場合の排ガス処理システムへの影響を評価することを目的として、当社が保有する火炉、脱硝触媒、GGH（ガス-ガスヒータ）熱交換器、電気集塵機および脱硫装置を有する燃焼・排煙処理一貫研究設備にバイオマスを供給するフィーダを追設した。その試験設備を使用しバルガ炭専焼時とスイッチグラスおよび木質（松）ペレットを発熱量基準で 25% 混焼した場合における各環境機器への影響を評価した結果、以下のことが分かった。

- (1) 短期間の運転では、脱硝触媒性能への影響はなかった。（図8 (a)）
- (2) バイオマスを混焼した場合、脱硫性能へ



(a) マルチバーナ試験炉

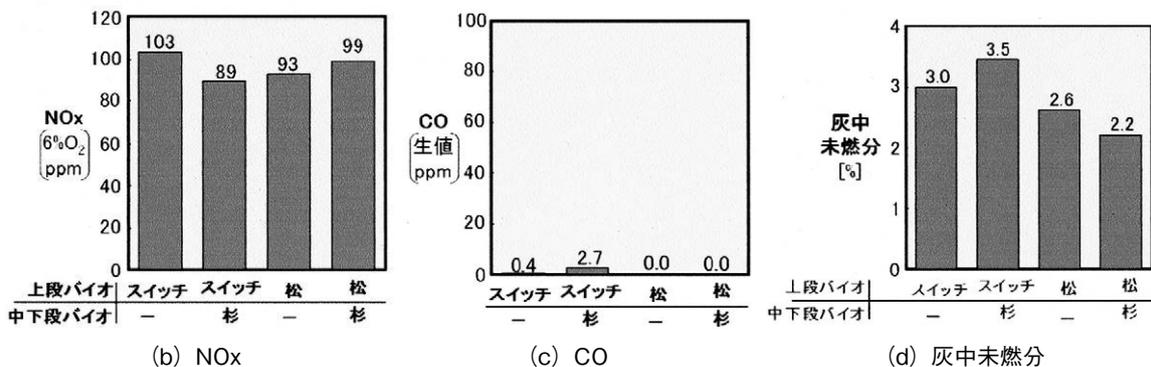
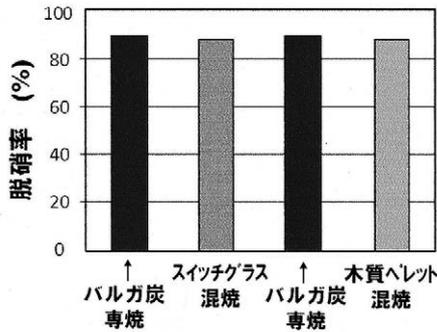


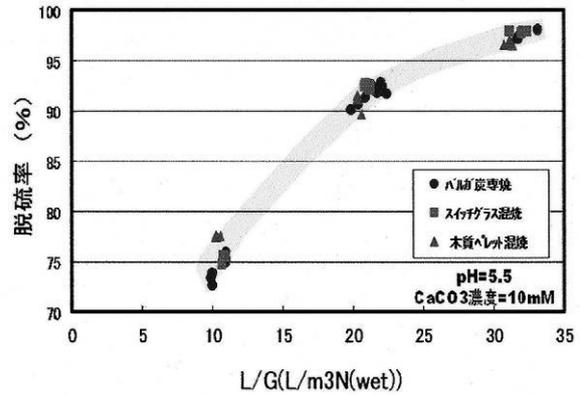
図7 マルチバーナ炉による混焼システムの特性評価

排ガス量 (m ³ N/h,wet)	950
触媒部温度 (°C)	385

入口NO_x=145 169 125 120 (ppm)
 出口NO_x= 16 20 14 14 (ppm)



(a) 脱硝触媒の性能評価結果



(b) 脱硫特性の評価結果

	バルガ炭 専焼	スイッチグラス 混焼	木質ペレット 混焼
Ca	82.3	102.8	91.2
Na	4.6	6.5	5.3
K	0.1	0.2	0.2
Cl	160.1	213.6	182.9

単位: mmol/L

(c) 試験後の脱硫液の分析結果

図8 燃焼・排煙処理一貫研究設備による脱硝・脱硫特性の評

の影響はほとんどなかった。材料面への影響もないと考えられる。(図8 (b))

(3) バイオマスを混焼した場合、GGH 熱交換器への灰付着速度は低下する傾向となった。(図省略)

(4) 一般的な低温 EP 条件 (ガス温度 160°C) では、スッチグラスペレット混焼時は、電気集塵機の集塵効率は向上し、木質 (松) ペレット混焼時は同等の性能となった。集塵効率が向上できる低低温 EP 条件 (ガス温度 100°C) では、石炭専焼時とバイオマス混焼時とでは、ほぼ同等の集塵効率となった。(図省略)

10. 実機ボイラ性能予測とシステムの成立性検討

バイオマス混焼率を 10 ~ 25% まで増加させ

た場合の燃料・空気・排ガス・排ガス再循環のシステムの検討を先の一連の試験結果 (ミル, バーナ, 燃焼システム, 排ガス処理システム) を用いて行い, 下記を確認した。図9 はボイラ下流のガス温度とガス流量が最大となる運転条件の例である。

- (1) エアヒータ出口ガス温度が極度に上昇しない (最大 5°C 上昇)
- (2) 排ガス量が極度に増加しない (最大 +8% 上昇)
- (3) 再循環ガス昇圧ファンの容量
- (4) ガス性状は大きな変化無く, 後流機器への影響は少ない

なお, 燃焼排煙処理一貫研究設備での試験結果のボイラシステムへの影響については特にフィードバックすべき事項は認められなかった。

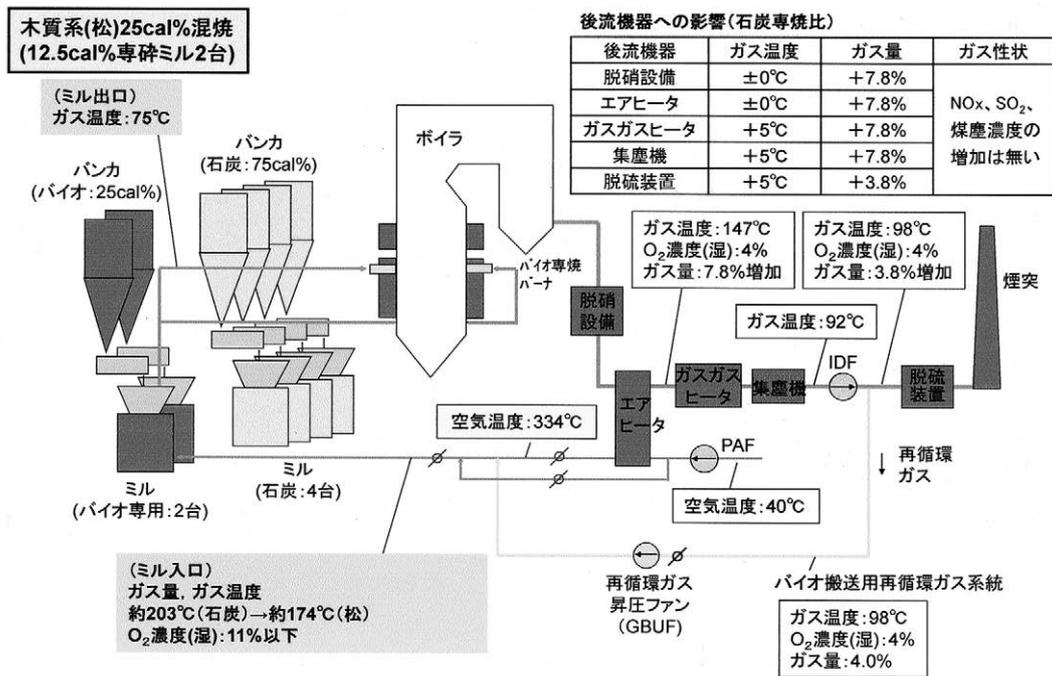


図9 成立性検討の例 (木質系(松) 25cal%混焼 (12.5cal%専砕ミル2台), O₂濃度: 11vol%)

11. まとめ

(1) 総合評価

表3に目標のバイオマス混焼率 25cal%に対する検討結果をまとめる。本研究によりケースAとEを除く以下全ケースの成立が可能となることを確認した。ケースAとEはチップ混砕時の過負荷解消に課題があり、ケースBとFのペレット混砕で代替可能を確認した。ケースCと

D, およびケースGとHは当初目標の専砕・専焼の入熱 20cal% / 2ミルを上回った(22.68cal% / 2ミル, 25cal% / 2ミル)。しかし、ミル改造により過負荷を解消し可能となった。その際の燃焼システム側も運用可能を確認した。

(2) 実機適用における本開発の効果

① 投資回収の効果

現在のところ炭素税の法整備が不透明であ

表3 目標のバイオマス混焼率 25cal%に対する検討結果

ケース	専用粉碎ミル			混合粉碎ミル		成立性	備考	
	酸素濃度 (vol%)	入熱 (cal%/缶)	原料種	入熱 (cal%/缶)	原料種			
A	2条件 1.爆発下限 18vol% 2.石炭並爆発強度 18vol%	20	ペレット (スイッチグラス)	5	チップ (林地残材)	×	当初計画のケース 混砕5cal%/缶は 6.25cal%/ミルに相当	
B		20		5	ペレット (スイッチグラス)	○		ケースAの代替。
C		22.68		2.32	チップ (林地残材)	○		専砕入熱は計画以上。 混砕2.32cal%/缶は 3cal%/ミルに相当
D		25		0	—	○		専砕入熱は計画以上。 (専砕過負荷抑制)
E	2条件 1.爆発下限 11vol% 2.石炭並爆発強度 18vol%	20	ペレット (木質(松))	5	チップ (林地残材)	×	当初計画のケース。 混砕5cal%/缶は 6.25cal%/ミルに相当。	
F		20		5	ペレット (木質(松))	○		ケースEの代替。
G		22.68		2.32	チップ (林地残材)	○		専砕入熱は計画以上。 2.32cal%/缶は 3cal%/ミルに相当。
H		25		0	—	○		専砕入熱は計画以上。 (専砕過負荷抑制)

り具体的な回収年の計算は困難である。しかし、従来方式との比較において概略以下のコスト低減の効果が期待できる。開発方式（既設ミル利用）は従来方式（専用粉碎ミル別置）に比べ設備コスト（投資額）が低くてすみ、相対的に回収年は低減する。従来技術に比べ本開発技術の場合、ミルとバーナとその制御改造が減額となり、排ガスダクト新設は同等、原料供給系統新設（バンカ、給炭機等）、別置専用ミルの周辺機器（潤滑油装置等）、燃焼系統（微粉ビン、IDF（誘引通風機）、燃料管等）、および配置スペースは不要となる。本開発技術によると改造コスト（投資回収年）は配置スペースをを両者0と仮定しても当社比で概ね半分以下に低減すると見込まれる。

② 波及効果

本研究にて狙った効果（既設缶での低コストと高混焼率の両立）に加え、以下の波及効果が期待できる。

(a) 国内新缶への応用展開、(b) インフラ輸出への技術の応用、(c) ミル・バーナ単体の専焼技術に基づくボイラ当たりのバイオマスの高混焼率化（運用ミルn倍化）への応用展開、(d) バイオマス製造、調達技術の評価への利用、(e) 高効率・大容量ボイラ（USC、A-USC）での使用による効率的CO₂低減、(f) RPSからFITへの移行によるIPP（卸電力事業）の事業の加速

福島第一事故後の安全確保の考え方について ～各分野の専門家との意見交換から～

久田 司 (原子力工学センター
次世代軽水炉開発グループ 主管研究員)



1. はじめに

当研究所では、東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、「福島第一事故」）の後、2012年度から原子力発電所の安全対策高度化に活用しうる技術開発プロジェクトに取り組んでいる。このプロジェクトでは、福島第一事故の教訓を踏まえ、原子力以外の分野の知見・経験を広く取り入れて技術開発を進めることとしている。

このため、その取り組みの一環として、原子力以外の分野の安全概念や安全確保の考え方に係る知見・経験を幅広く収集し、プロジェクトへの反映を図ることを目的として検討会（以下、「知見取り入れ検討会」あるいは「検討会」）を実施している。この知見取り入れ検討会では、原子力以外の分野において、不断の安全性向上が求められる分野から専門家を招き、当該分野に係る講演と、プロジェクト関係者との意見交換を行っている。

本稿では、これまでに開催した検討会の成果について、検討会での講演および意見交換の内容に基づいて筆者の視点で取りまとめて紹介する。

2. 検討会の趣旨

2011年3月の東日本大震災では、設計想定を超える巨大な津波が福島第一原子力発電所を襲い、過酷事故を引き起こし、環境中への放射性物質の大量放出に至った。この震災を

契機に「想定外」という言葉が各種メディアで頻繁に使用され、様々な分野の学会や講演会等では、想定外への備え、あるいは想定外への対応をキーワードとして、震災や事故を防ぐことができなかつた反省や教訓が盛んに議論された。

このような状況の下、プロジェクト関係者が福島第一事故を踏まえて原子力の安全確保について再考する場として、知見取り入れ検討会を企画した。検討会では、原子力以外の分野の安全概念や安全確保の考え方に関して、原子力分野との共通点や相違点を学ぶとともに、想定外に備えるためにはどうすればよいか、社会的信用を獲得するためには何が必要か、今後の原子力安全はどうあるべきか、といった論点について、他分野の専門家との意見交換を通して知見を共有することとした。

3. 開催実績

知見取り入れ検討会は、2012年度から年1回の頻度で開催している。年度毎にテーマを選定し、各回2名の講師を招いて各分野に係る講演と、プロジェクト関係者との意見交換を行っている。テーマと講師の選定については、近年の公開シンポジウムでの講演や著作、Webに公開されている記事などの情報を収集調査し、検討会の開催趣旨に合致し、今後の原子力の安全確保を考える上で参考になると考えられるテーマを選定している。2012年度と2013年度の開催実績を表1に示す。

表1 「知見取り入れ検討会」の開催実績

	2012年度	2013年度
開催日	2013年1月21日(月)	2014年1月24日(金)
テーマ	航空分野における安全確保の考え方	化学プラントの安全確保の考え方 「工学システムの安全目標」の考え方
講師と 講演内容 (敬称略, 所属は開催 当時)	町田 茂:(独)宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ 運航・安全技術チーム 「航空安全に係る設計対策及び安全対策の考 え方」 (講演内容) ・航空輸送における安全確保の考え方 ・航空機事故の未然防止—警鐘と云うべき事 故に学ぶ ・万が一の時のための対策 ・技術の限界—現状の対策に満足しない ・今後の取り組みの方向性 小林 忍:(株)JALエアロ・コンサルティング 『「航空機事故に学ぶ」—危険学の視点—』 (講演内容) ・代表的な航空事故とその教訓 ・巨大・複雑システム事故の特長 ・想定外事故に備える ・原発を考える	中村昌允:東京工業大学イノベーションマネ ジメント研究科客員教授 「化学プラントの安全確保の考え方」 (講演内容) ・最近の化学プラント事故の概要 ・化学プラントの安全目標の見直し ・化学プラントの安全設計(防衛階層, 本質 安全設計) ・原発事故と化学プラント事故との相違 松岡 猛:宇都宮大学基盤教育センター非常勤 講師, 日本学術会議会員 「工学システムの安全目標の考え方」 (講演内容) ・安全目標設定の目的 ・基本的考え方 ・安全目標策定に関する前提 ・安全目標の要件 ・安全目標の概念(人命を対象とした目標, 社会的リスクに関する目標) ・工学システムの安全に対する要求事項
意見交換の 論点	・航空安全と原子力安全の共通点は何か, 違いは何か ・想定外に備えるためにはどうすればよいか ・航空安全の考え方から学ぶべきことは何か ・社会的信用を獲得するためには何が必要か ・今後の原子力安全はどうあるべきか	・化学プラントの安全と原子力安全の共通点 は何か, 違いは何か ・想定外に備えるためにはどうすればよいか ・化学プラントの安全の考え方から学ぶべき ことは何か ・工学システムに関する安全目標の考え方と 原子力分野の考え方は一致しているか ・社会的信用を獲得するためには何が必要か ・今後の原子力安全はどうあるべきか

2012年度は「航空分野における安全確保の考え方」、2013年度は「化学プラントの安全確保の考え方」と「『工学システムの安全目標』の考え方」をテーマとして選定した。航空機と化学プラントは、原子力プラントと同じように複雑かつ巨大な工学システムであり、万一大きな事故が発生すれば、利用者や周辺住民に大きな影響を与えるという共通点がある。また、工学システムの安全目標は、日本学術会議の安全目標のガイドライン検討小委員会において検討が進められており^{※1}、その考え方は、今後の原子力の安全確保を考える際に大いに参考にすべきものと考えられる。このような観点から、各々を検討会のテーマとして選定した。

4. 検討会の成果

本項では、知見取り入れ検討会のこれまでの成果について、講師の講演概要と意見交換で示された意見の要点を整理して紹介する。

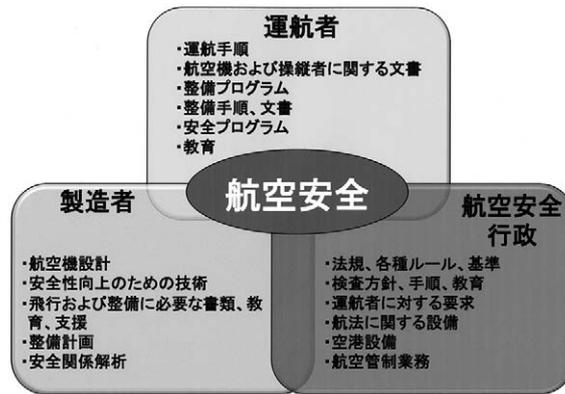
(1) 講師の講演概要

① 町田 茂氏:「航空安全に係る設計対策及び安全対策の考え方」

- ・旅客機での事故による死亡率は、他の輸送機関に比べ1～2桁低い^{※2}
- ・受け入れ可能なりスクは航空安全システムに寄せられる社会からの信頼度に関係し、この信頼度は事故が発生するたびに低下する

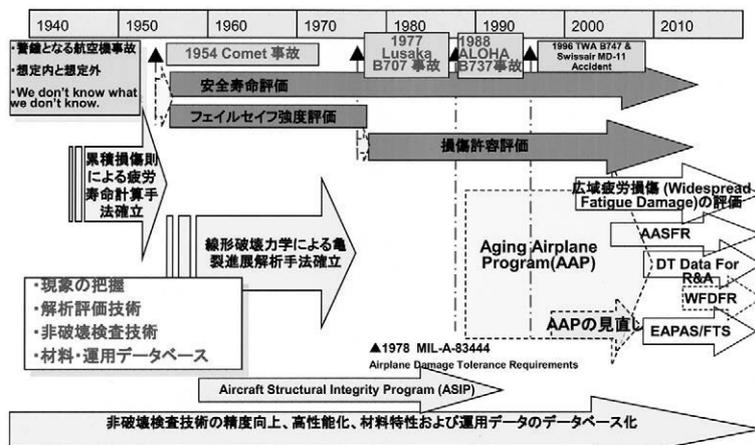
※1 2014年9月17日、日本学術会議から報告「工学システムに対する社会の安全目標」が公表された。

※2 米国の交通機関ごとの事故による死亡率(10億人・マイルあたり)(2006～2008年平均)は、乗用車0.61人、バス0.05人、鉄道(旅客列車)0.06人、定期旅客機0.003人(全米安全評議会, “Injury Facts 2011”による)



(出所：町田氏講演資料)

図1 航空安全確立と維持のための役割・責任分担



(出所：町田氏講演資料)

図2 航空機構造の疲労評価基準の変更と技術革新

- 航空安全確立と維持のため、製造者、運航者、航空安全行政には明確な役割・責任分担がある (図1 参照)
- 警鐘と言うべき航空機事故の経験から航空機構造の疲労評価基準を改善 (図2 参照)
 - Comet 機事故 (1954) : 金属疲労の評価手法の変更
 - Lusaka B707 事故 (1977) : 損傷許容評価手法 (損傷があることを前提とした評価手法) を導入
 - ALOHA B737 事故 (1988) : 設計運用寿命中に広域疲労損傷が起きないことを証明する要求
- 事故と耐空性基準の変遷は, "We don't know what we don't know." (我々は, 何に気が付いていないかを知らない) という

教訓を教えている

- 万が一の時のための対策 (たとえ事故が起きても乗員および乗客が助かる対策) として, 実機クラッシュ試験による耐衝撃性研究を進め, 座席および座席取付け部に対する動的試験を耐空性基準で要求している
- 現状の対策に満足せず, Un-known な領域を少なくすべく航空機構造の信頼性・安全性の研究開発が継続されている
- 航空業界では, 対処療法的な安全管理から, 予防的な方法を採用した安全マネジメントに向かっている

② 小林 忍 氏 : 「『航空機事故に学ぶ』 —危険学の視点—」

- 航空機事故率は 100 万出発当たり 0.5 件と

安全な乗り物になっているが、空の安全を
進歩させたのは「戦争」と「事故」(Tomb
Stone Theory: 墓石理論)である

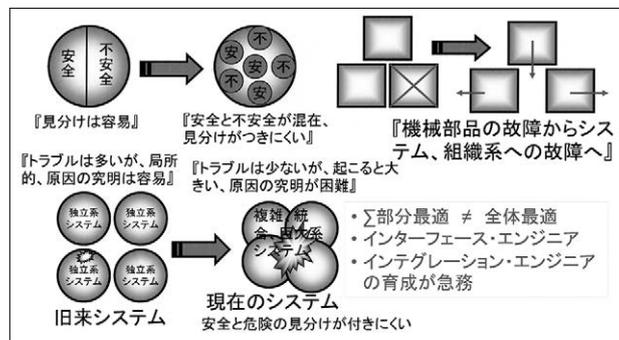
- 民間航空機の各性能(巡航速度, 航続距離,
離陸重量等)はすでに飽和し, 環境(燃費,
排気)改善と安全向上へと向かっている
- ヒューマンエラーによる重大航空機事故例
 - カナリア諸島テネリフェ事故(1977):
悪条件の重複
 - イースタン航空 L1011 事故(1972):
一点集中の脆弱
 - 日本航空 JAL747 事故(1985): 現場と
スタッフの乖離
→ ヒューマンエラーは環境に左右される
- 組織事故の典型例
 - スペースシャトル・チャレンジャー号
事故(1986)
→ 組織が巨大, 複雑, 細分化されると
円滑なコミュニケーションに綻びが
生じる
- 現在のシステム(複雑, 統合, 巨大系)では,
旧来システムとは異なるリスクが潜んでい

るが(図3参照), 複雑・統合・巨大系シ
ステムの事故は, 技術の先端や頂点(未知
の領域)ではなく, それを支える中間, 底辺,
裾野(既知の領域)で発生し, システム全
体に波及する

- 想定外に備えるためには, 多重システムが
独立しているだけでなく, 環境(緩和, 遮断,
隔離, 分離)を変える必要がある(図4参照)

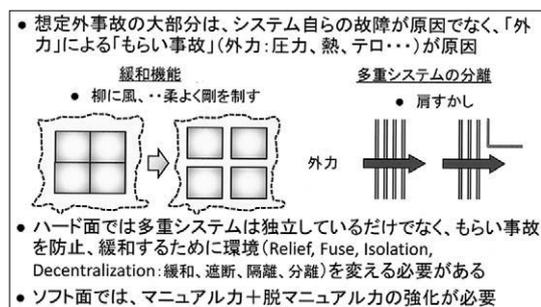
③ 中村昌允氏:「化学プラントの安全確保の 考え方」

- 化学プラントに特有の「爆発火災事故」は,
発生件数は少ないが, 社会に及ぼす影響は
極めて大きい(図5参照)
- 近年の化学プラントの事故の構図
 - 事故は非定常作業時に発生
 - 突発的・未経験の事態に対応できず,
 - 直前まで異常事態の進行に気付かず
 - 反応暴走が発生する認識の欠如
- すべてのリスクに対応することは不可能
である



(出所: 小林氏講演資料)

図3 複雑・統合・巨大系システムに潜むリスク



(出所: 小林氏講演資料)

図4 想定外に備える(多様性の採用)

<p>(1)化学プラントに特有な事故:『爆発火災事故』 『爆発火災事故』は発生件数が少ないけれども、 社会に及ぼす影響は、極めて大きい。</p> <p>(2)最近起きた3件の重大事故は、いずれも「反応暴走」 反応熱を除去できず、系内温度の上昇とともに、反応速度が加速、 遂には反応暴走となり、爆発時に大きなエネルギーを放出。</p> <p>(3)安全目標並びにプラント設計への影響</p> <p>① すべてのリスクには対応できない。 ・リスク：労働災害に、環境並びに社会的影響を加味 ・重大事故の防止</p> <p>② 社会的影響:敷地境界外に影響を及ぼすか否かがポイント</p> <p>③ プラント設計: 品質・効率性から、「本質安全設計」へ プラント内の危険物質保有量を少なくし、災害規模を最小化</p>

(出所:中村氏講演資料)

図5 化学プラントの事故と安全目標並びにプラント設計への影響

表2 日本と欧米の安全に関する考え方の違い

日本の考え方	欧米の考え方
・災害は努力すれば、 二度と起こらないようにできる。	・災害は努力しても、 技術レベルに応じて必ず起きる。
・災害の主原因は人である。	・災害防止は、技術的問題である。
・管理体制を作り、人の教育訓練をし、 規制強化により、安全を確保できる。	・人は必ず間違いを犯すものであるから、 技術力向上なしに安全は確保できない。
・安全衛生法で規制 災害が発生するたびに規制を強化	・事故が起こっても、重大災害に至らない 技術対策
・安全は、基本的にただである。	・安全は、基本的にコストがかかる。
・安全コストを認めにくい。	・安全にはコストをかける。
・最低限のコストで対応し災害対策の 技術的深耕をしなかった。	・危険源を洗い出し、リスクを評価し、 コストをかけ、災害の低減化努力をする。
・見つけた危険をなくす技術 (危険検出型技術)	・論理的に安全を立証する技術 (安全確認型技術)
・度数率(発生件数)の重視	・強度率(重大災害)の重視

(出所:中村氏講演資料)

- 優先順位を付けて対応, ALARP 原則の適用, 残存リスクは関係者で情報共有
- 重大事故を契機とした安全目標の見直し
 - 重大事故の防止
 - 敷地境界外への影響防止
 - プラント設計は品質・効率性から「本質安全設計」へ(プラント内危険物保有量を少なくし, 災害規模を最小化)
- 日本と欧米では安全に対する考え方の違いがある(表2参照)
 - (欧米の考え方) 災害防止は技術的問題, 人は必ず間違いを犯すから技術力向上なしに安全確保はできない, 安全にはコストをかける, 強度率(重大災害)の重視
- 化学プラントの防御階層は, 緊急時対応および地域防災を含めた8層からなる
- 化学プラントでは, 事故原因を調査して公表, 対策を講じれば運転再開が可能であるが, 原子力プラントでは困難
- ④ 松岡 猛 氏:「工学システムの安全目標の考え方」
- 日本学術会議, 工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会において「工学システムの安全目標」が検討されている
- 「リスク」の概念を経由して「安全」を定義し, 「受容できないリスクがないこと」(ISO/IEC Guide51 の定義)を念頭に議論されている(図6参照)
- 目標値として2種類の基準値を設定している(図7参照)
 - 達成できない場合は許容されない基準値(A): 受け入れ不可能なレベルのリスク
 - 更なる改善を必要としない基準値(B): 無条件で受け入れ可能なレベルのリスク
- 基準値の設定には, 人命(生涯死亡リスク)を対象とした目標, 社会的リスクに関する目標など多面的に検討している
- 安全目標は時代と共に変化するという認識に

安全とは何か？
「安全」はどんな危険も存在しないという否定形で表され、具体的に指定できない。
「リスク」という概念を経由して「安全」を定義する。
「受容出来ないリスクがないこと」(ISO/IEC Guide 51の定義)を念頭において議論を行っている。

(出所：松岡氏講演資料)

図6 安全の定義

立ち、理想的な社会状況を目指した理念的なものではなく、現代社会において実現が可能なもの(今後の努力により技術的にも経済的にも達成可能なもの)としたい

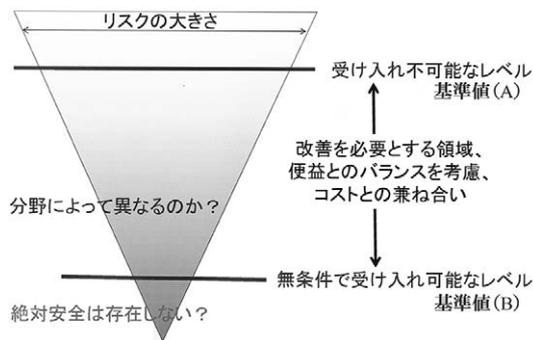
- 安全目標の設定においては、経験した事故の再発防止はもちろんのこと、未然防止の考え方も重視したい
- 安全目標は、人命に加え、社会リスクの最適化の観点も考慮に入れる

(2) 検討会から得られた知見

講演および意見交換のまとめとして、意見交換の論点に沿って、検討会から得られた知見を以下に整理して示す。

論点① 原子力分野との共通点は何か、相違点は何か

原子力分野との共通点、相違点という論点に関しては、色々な視点から、様々な指摘ができると思われるが、ここでは、主に講師の



(出所：松岡氏講演資料)

図7 安全目標における2つの基準値

講演内容から、いくつかの共通点、相違点を示す。

[共通点]

- いずれの分野も事故の発生頻度は低いですが、事故が発生した場合には社会に及ぼす影響が大きい。
- 警鐘と言うべき事故を経験し、それを契機として安全基準や安全目標が見直されている。
- 受け入れ可能なリスクは社会からの信頼度に関係し、その信頼度は事故の発生により低下する。
- 組織が巨大、複雑、細分化されると円滑なコミュニケーション(繫目)に綻びが生じる。
- 安全を確保するために、緊急対応や地域防災を含めた多重な防御階層の概念がある(表3参照)。

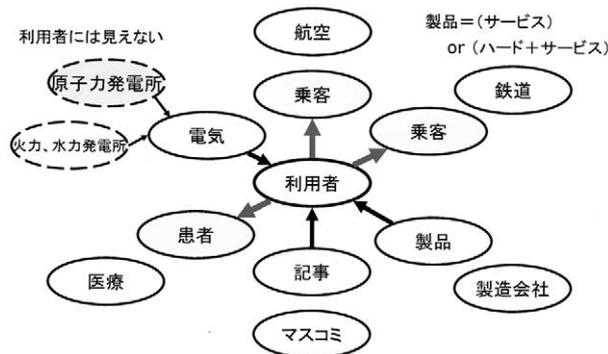
[相違点]

- 航空や化学プラントと比べ、原子力の歴史は浅く、重大事故の経験が少ない。
- 航空分野は製造者、運航者、運航安全行政の

表3 化学プラントの防御階層

階層	具体例
第1層	プロセス設計 プロセスの本質安全化(危険物滞留量の最小化)
第2層	基本プロセス制御システム DCS等による通常運転時のプラント監視 プロセス値が、設定値から逸脱すれば警報を発する
第3層	警報処置 運転員によるプラント停止 運転員が介入する時間的余裕がある場合
第4層	自動安全計装システム 計装によるプロセス安全システムや緊急停止措置 運転員が介入する時間的余裕がない場合、システムが自動的にプラントを停止
第5層	物理的防護(1) 安全弁(圧力逃し弁など)による圧力防御システム
第6層	物理的防護(2) 液漏洩を局所化するための防油堤など
第7層	緊急対応計画 事業所内の緊急時対応
第8層	地域防災計画 地域住民・公共施設における緊急時対応

(出所：中村氏講演資料)



● 人間は、身近なものほど過敏

(出所：小林氏講演資料)

図8 利用者と業種の距離

役割と責任分担が明確であり、国際民間航空機関（ICAO）の規定に準拠した体系により国際的に共通した審査基準が定められている。

- 航空分野では、万一の事故時の対策として、耐衝撃性の研究に実機を用いたクラッシュ試験も行われている。
- 化学プラントでは、事故原因を調査・公表し、再発防止策を講じれば、プラントの運転が再開できるが、原子力では難しいものがある。
- 原子力分野は利用者との間に距離がある（利用者との関係は電気を介しており、電気の発電源が利用者には見えない）（図8参照）

論点② 想定外に備えるためにはどうすればよいか

この論点に対しては、我々が想定できる範囲は限られており、想定外（リスク）をなくすことはできない、という共通した意見が示された。さらに、想定外の事象が起こった場合に備え、どのように対応するかを検討しておくことが重要である、という意見が示された。主な意見を以下に示す。

- 人間は自分が知っている範囲しか考えることができない。想定外への対応には、自分の知識の幅を如何に広げるかが重要である。
- 想定外に備えるためには、事前調査を十分に行うこと、設計に裕度（安全率）を持つこと、それでも事故は起きると考えて対策をすること、が重要である。

- 色々な可能性を論理的に考えて全て洗い出すことが必要である。それでも出てこないことは必ずある。また、想定外として切り捨てているものについても踏み込んで考えるべきである。
- 自然現象を含めて We don't know what we don't know が結構多く、分からないことを1つずつ潰していくことが技術者として大切な役割、責務ではないか。
- 現状に満足せず、Un-knownな領域を減らすべく信頼性・安全性の研究開発を継続することが重要である。

論点③ 社会的信用を獲得するためには何が必要か

この論点に対しては、論点②で示されたように想定外の事象は必ずあり、我々はそのリスクの中で生活していることを技術者がきちんと説明すべきという観点が特に強調された。また、そのために必要な技術者の役割に関しても意見が示された。主な意見を以下に示す。

- すべてのリスクに備えることはできない。しかし、社会はリスクゼロを達成できるかのように認識している。
- 100%の安全はなく、必ずリスクが存在する。リスクを受け入れ、最小化し、これに備える社会づくりが必要である（図9参照）。
- リスクについて社会に正しく説明し、理解してもらうためには、データを示して説明するしかない。

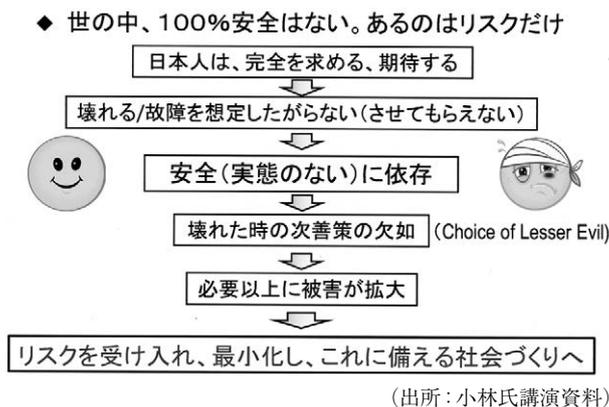


図9 参加型社会づくりへ

- 技術者は自分の声で、リスクがあることを社会に説明しなければならない。そのバックボーンとなるのが、学会議の安全目標ではないか。
- 巨大なシステムでは、完璧に作ったとしても、どこに漏れ(故障, 事故)が出るかわからない。それに備えて頑張っていると、きちんと説明した方が社会の安心感が得られる。
- 安心は、説明する人達を信用できるかが前提にある。技術者は、信頼されるような立場、態度で説明し、信頼を得ることが説明を聞いてもらう大前提である。
- データは技術者が上手く説明するための手段ではあるが、相手は誠実に説明しているかを聞いている。如何に正直かつ誠実に説明をするか、それが最も重要である。

論点④ 安全目標・安全確保の考え方

この論点に対しては、各分野での安全目標・安全確保の考え方も踏まえて、以下のような意見が示された。

- 原子力プラントは非常に丈夫に作られているが、航空機のように壊れることを前提とした備え(評価, 対策, 保守等)が必要ではないか。
- 航空機の場合、商業ベースでリーズナブルな安全性により航空機が作られている。重要なのは、安全に対する社会的コンセンサスが得られているかである。
- 原子力の安全目標の場合、社会的コンセンサ

スを得るためには、炉心損傷頻度だけでなく、環境影響の被害の大きさまで示さないと理解は得られにくい。

- これまでは影響の大きさと頻度の掛け算でリスクを表し、リスクが低ければ良いとしてきたが、福島第一事故を受けて大切なことは、多重の防護対策によりリスクを低くしていても破局的な事故は起こしてはいけない、また、事故が起きた際の対策をしておかなければいけない、ということである。
- 化学プラントの事故の要因には現場力の低下がある。人間の力が低下してきたときには、設備・システムでカバーする事を考慮せざるを得ない。設計段階でどこまで考慮するかを考える必要がある。

論点⑤ 今後の原子力安全はどうあるべきか

上記の論点②から論点④において、今後の原子力安全を考える際に考慮すべき、示唆に富む意見が多く示された。これら検討会の意見に基づいて総括すれば、今後の原子力安全に関しては、福島第一事故の反省、教訓を踏まえ、原子力施設の安全確保の基本概念である深層防護に基づいて安全確保を徹底するとともに、上記の想定外の備え、リスクの考え方、安全確保の考え方等について、どのように、また、どこまで考えているのかを社会に誠実に説明していくことが重要である、とまとめることができる。

5. まとめ

本稿では、当研究所が実施している知見取り入れ検討会の成果を紹介した。これまでに、航空分野と化学プラントの安全確保の考え方、工学システムの安全目標の考え方をテーマとして検討会を実施した。検討会での講師講演と意見交換を通して、原子力分野と他分野の共通点や相違点を見出すことができた。また、今後の安全確保について検討する上で重要な視点となる、想定外への備えや社会的信用の獲得のためには、リスクの考え方や技術者として誠実に説明する姿勢が重要であることが強調された。このような知見は、原子力分野に限ることなく、広く工学・科学一般に共通するものであり、今後の研究所の活動においても大いに参考となるものであった。検討会は本年度も継続して実施することを計画している。さらに検討を進め、今後の安全確保に関する提言等に結びつく成果を得られるよう努力したい。

[謝辞]

本稿に紹介した検討会は、安全確保に係る知見をプロジェクト関係者で共有するために開催したものであるが、講師の先生方の許可を得て講演内容および意見交換の成果を紹介した。検討会に参加いただいた講師の先生方、プロジェクト関係者に謝意を表す。

環境適合型・高効率バイナリー発電の技術開発

蓮池 宏 (プロジェクト試験研究部 部長)



小川紀一郎 (プロジェクト試験研究部 参事)



大内 優 (プロジェクト試験研究部 研究員)

堀口 章 (元プロジェクト試験研究部 特別嘱託研究員)

松尾 栄人 (㈱アーカイブワークス 代表取締役)



松尾 雅智 (㈱アーカイブワークス 製造部長)

1. はじめに

昨今、再生可能エネルギー利用による発電量増大の狙いから100℃前後の温泉源等の低温熱源からの発電として小出力バイナリー発電(加熱源より沸点の低い媒体を加熱蒸発させてその蒸気でタービンを回す方式)が注目されている。現在実用化もしくは開発中の技術として、タービン駆動用媒体(以下、作動媒体)にアンモニア、ペンタン、あるいは代替フロンなどの低沸点媒体を利用したシステムがある。しかし、それらの技術は、アンモニアは毒性、臭気性、腐食性、可燃性、ペンタンは可燃性、爆発性等、安全面、環境面の問題があり、代替フロンは安全面の問題はないが、地球温暖化係数が高いという環境面の問題がある。また、一般的に蒸発温度一定としている等の理由からその効率は低い。

本稿で述べる環境適合型・高効率バイナリー発電システム(以下、「本システム」と略称)は、

環境性と安全性を確保するため作動媒体に水を採用し、負圧雰囲気加熱蒸発させて発電する方式であり、従来同媒体に指摘された効率面の課題を圧力の異なる2段階の蒸気サイクルを採用し解決するとともに、構成機器の性能向上および高効率化等により経済性面でも優れる可能性を期待したものである。

本システムは、環境省から平成24年度の委託事業「地球温暖化対策技術開発・実証研究事業(環境適合型・高効率バイナリー発電の技術開発)」にて2年計画で20kW級試験機を設計・製作し、試験を行ったものであり、最終的には計画方式(2軸2段方式)にて20kW発電成功を始めとして所期目標を達成した。さらに経済性向上を狙った新方式(1軸2段方式)の原理検証試験にも成功した。なお、100℃以下の温水から2軸方式による発電試験成功例は、筆者等の知る限り世界初と理解している。本稿では同成果の一部を紹介する。

2. 水バイナリー発電とは

(1) バイナリー発電の開発経緯⁽¹⁾⁽²⁾

日本の地熱発電の賦存量および導入ポテンシャルを表1に示す。賦存量とは地熱資源データから推定される理論熱量，導入ポテンシャルとはそのうち現在の技術で利用可能な熱量を示す。同表に示す通り，高温域である150℃以上の温度区分では賦存量2,357万kW，導入ポテンシャル636万kWである。この温度域では，従来の地熱発電方式（フラッシュ型）が導入されている。一方，低温域である53～120℃の温度区分の賦存量は849万kW，導入ポテンシャルは751万kWであり，さらに温泉に絞った場合，賦存量および導入ポテンシャルとも72万kWにのぼるが，それらはほとんど未利用である。現在の地熱発電全体の総設備容量は約54万kW程度であることを考えると，低温域のポテンシャルがいかに大きいかがわかる。しかし，温泉発電は研究開発が始まった段階で一部実用機を含めても数千kWに過ぎない。その理

由は，環境面はもとより実用性と経済性でユーザー（温泉組合等）を満足させる技術が完成していないことが挙げられる。なお，温泉発電とは入浴用には熱すぎる高温温泉（例，90℃）から入浴適用温度（例55℃）までの熱量を利用するものである。

地熱資源温度が低い場合や，資源量が少ない小規模地熱発電用熱源は，従来の地熱発電方式（フラッシュ型）では，蒸気タービンの小規模化に伴い著しい性能低下を生じる等，技術面および経済面で問題があるため，バイナリー発電技術の研究開発が行われてきた。

(2) バイナリー発電の種類と特徴

従来のバイナリー発電における作動媒体は，冒頭でも述べたように水アンモニア混合物，ペンタン，代替フロンがあるが，安全面，環境面の課題が残っている。また，上記バイナリー発電は，カーリーナサイクルを採用している水アンモニアを除き発電効率が低い。表2に各種バイナリー発電の概要を示す。

表1 日本の地熱発電の賦存量および導入ポテンシャル

温度区分	賦存量 (万 kW)	導入ポテンシャル (万 kW)
150℃以上	2357	636
120～150℃以上	108	33
53～120℃	849	751
温泉発電*	(72)	(72)
合計	3314	1420

※温泉発電は、53～120℃の低温域を活用したバイナリー発電の一部

(出所：平成22年度環境省委託事業「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」)

表2 各種バイナリー発電の概要

作動媒体	水アンモニア	ペンタン	代替フロン	水 (本システムで採用)
サイクル	カーリーナ	ランキン	ランキン	ランキン
サイクル効率	○高	△低(単段)	△低(単段)	○高(高低圧段)
機器構成	△複雑	○シンプル	○シンプル	○シンプル
機器寸法	○小	○小	○小	△大
腐食性	△大	○なし	○なし	○小(対応容易)
安全性	△可燃、毒性	△可燃、毒性	○不燃	○不燃
環境影響	△臭気、毒性	△揮発引火性	△温暖化係数大	○問題なし
ボイラ・タービン技術者	△要	△要	○不要の見込みあり	○不要
開発例	有り	有り	有り	少ない

一方、本システムはそれらの環境、安全性に係る問題が全くなく、また効率面でも水アンモニアサイクル（カーリーナサイクル）と同等以上を可能とするものであり、その詳細は次項（本章第3）にて述べる。

（3）本システムの特徴

① 2段ランキンサイクルの採用

（高効率化の原理）

本システムは、蒸発部を高圧、低圧に分けた2段ランキンサイクルを採用した。単段サイクルから2段サイクルへ分けることで、温泉熱源の90℃から55℃の温度差の有するエネルギーをより効率的に利用するものである。図1に両者の相違を示す。これは、単段に比べ2段に利用することで部分的に蒸発温度を上げ、凝縮温度を下げることで、全体として出力増加が可能となったためである（図1の台形面積が増加していることで示される）。単段と比較して、2段では3～5割の発電出力が向上し、その結果、発電効率の向上が見込めることがわかった。なお、原理的には2段より3段と段数を増加させた方が効率は上昇するが、経済性、レイアウト等の総合的視点からこの規模（20kW）では2段が最適と判断した。

② 高速タービン発電機、ガス軸受の採用

本システムでは、高速ラジアルタービン（20kWで35,000rpm）を採用した。同タービ

ンによりコンパクト化を実現するとともに、この種の規模では軸流式やスクリー式より高いタービン効率（20kWで80%以上）を可能とする。また、永久磁石式高速発電機を直結し、減速機ロス無くしたタービン発電機一体構造を採用した。また、この高速回転を支える軸受構造として、水・蒸気軸受を開発・採用した。水蒸気軸受とは回転数が低い時は高荷重に耐える水、回転数が上がると蒸気軸受となる様な軸受構造を持ったものである。詳細は後述（第4章第1節）するが、これにより軸受ロスの低減を図るとともに蒸気軸受の弱点である低速時の耐荷重能力の向上が可能となった。

③ コンパクト型低圧損熱交換器の採用

蒸発器と凝縮器において、高伝熱性能と低圧力損失を同時に達成することを狙ってプレート型熱交換器を採用した。これは、体積当たりの伝熱面積が大きく、また伝熱係数も大きいいためコンパクト化が可能で、従って圧力損失低減上も有利となる。

④ 1軸2段ランキンサイクルの試行

上記（1）の2段サイクルは、高圧段と低圧段と各々単独にタービン発電機を備えたいわゆる2軸2段サイクルであるが、さらなるコストダウンを狙って1軸2段ランキンサイクルが考えられる。本研究においては、将来の実用機設

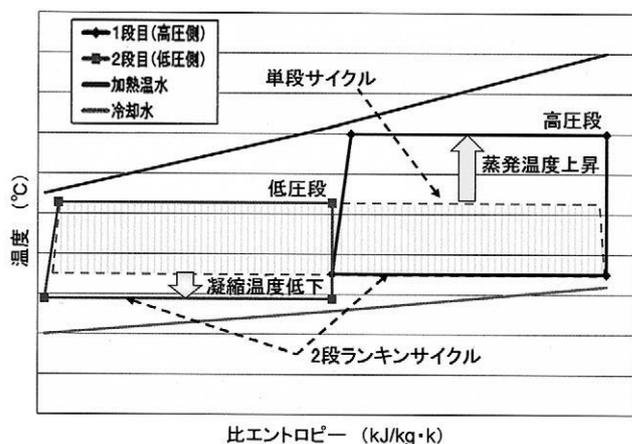


図1 多段ランキンサイクルの原理

計の有益データ取得に備えて、同装置を検討し、試験的に採用した。

3. 熱物質収支

(1) 設計条件および目標性能

水を作動媒体とした20kW級バイナリー発電システムについて設計条件に基づいてサイクル計算を行った。設計条件を表3に、目標性能を表4に示す。全体発電システムの目標性能は、温水入口温度90℃、同出口温度55℃、および冷却水入口温度20℃、同出口温度32℃の条件下で発電出力20kW、発電効率は2段システム全体として5.0%以上の目標値を掲げているが、実用機(40～100kW)では、6%以上となる目標値も立てた。

(2) 計算結果

試験に先立ち、サイクル計算を行った結果を表5に示す。上記の基礎として、高圧段と低圧段の発電出力割合によって発電効率が変化するため、最高発電効率を得る組合せを検討した。その組合せは、「高圧段」対「低圧段」出力比を、6対4にすることが最適値であり最高発電効率を得られることを見出した。その結果を図2に示す。なお、全体効率は以下の式により定義する。最適発電出力割合(高圧段発電出力12kW、低圧段発電出力8kW)において発電効率6.3%(目標5.0%以上)を得る見通しを得た。上記の最高効率時の熱物質収支結果を図3に示す。

$$\eta_T = \frac{W_h + W_l}{Q_{hin} + Q_{lin}}$$

η_T : 全体発電効率 (%)
 W_h : 高圧段出力 (kW)
 W_l : 低圧段出力 (kW)
 Q_{hin} : 高圧段入熱 (kW)
 Q_{lin} : 低圧段入熱 (kW)

表3 設計条件

項目		条件
タービン発電機	発電出力(高低圧段)	20kW
	回転数	35,000rpm
	高圧段蒸気条件 (タービン入口/出口)	0.031MPa×70℃ /0.0056MPa×35℃
	低圧段蒸気条件 (タービン入口/出口)	0.0141MPa×53℃ /0.004MPa×29℃
熱源	温水入口温度	90℃
	温水出口温度	55℃
冷却源(冷却塔方式)	冷却水入口温度	20℃
	冷却水出口温度	32℃

表4 目標性能

項目		目標性能
タービン発電機	発電出力(高低圧段)	20kW
	タービン効率	80%
	発電機効率	92%
システム	発電効率(20kW級)	5%以上 (上段:7.2%、下段5.3%)

表5 計算結果

項目		目標性能
タービン発電機	発電出力(高圧段)	12kW
	発電出力(低圧段)	8kW
	全出力	20kW
システム	発電効率	6.3%

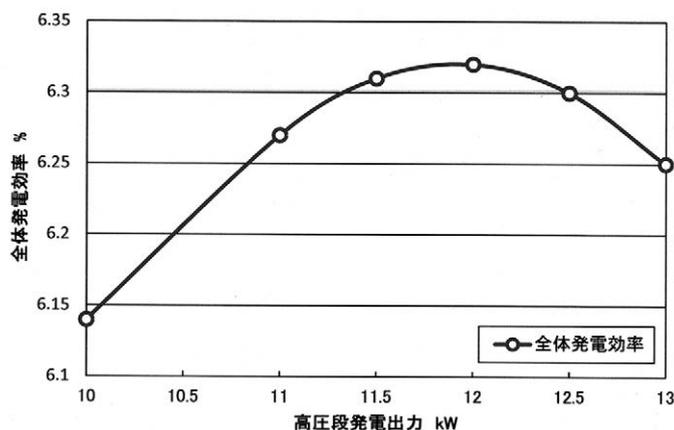


図2 高低圧段の最適出力割合

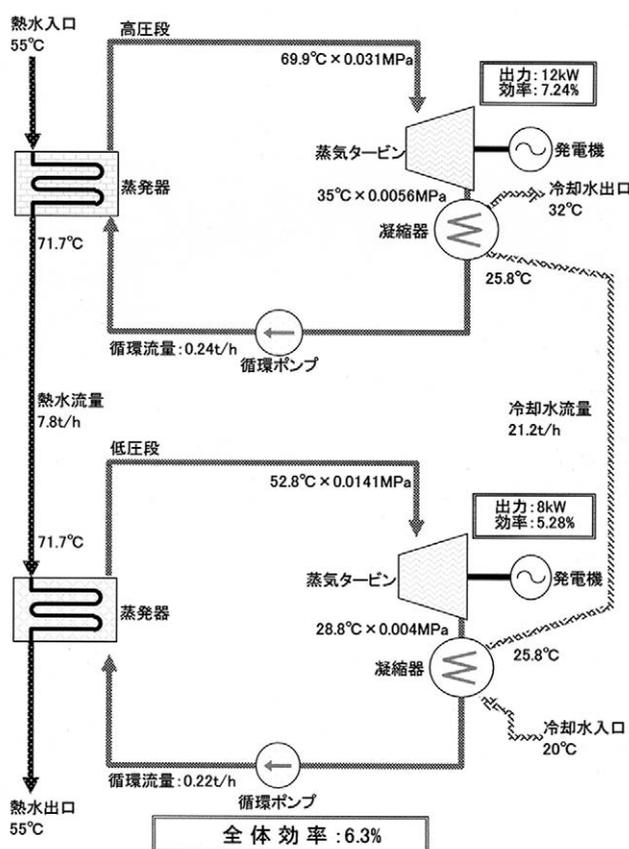


図3 高低圧段熱物質収支計算結果（定格条件）

(3) 温水必要湯量

温泉地等でバイナリー発電装置の運転を行う場合、温泉組合との関係から所要湯量を確保できない場合があり、所要湯量は少ない方が望ましい。本システムは、必要な湯量が7.8t/h（20kW相当）と少なく、1kWの発電に必要な温泉量は0.39t/hである。同量であれば、温泉井戸1本で発電が可能のため、湯量確保

の問題は少ないと考えられる。例えば、フロンを作動媒体に用いた他社バイナリー発電装置では約1.3t/hであり、同値は計画値であるが他方式（カーリーナサイクル除く）に比べて必要湯量が半分以下である。水バイナリー発電装置は、環境面、安全面、効率面のみならず、必要湯量も削減可能なことがわかる。

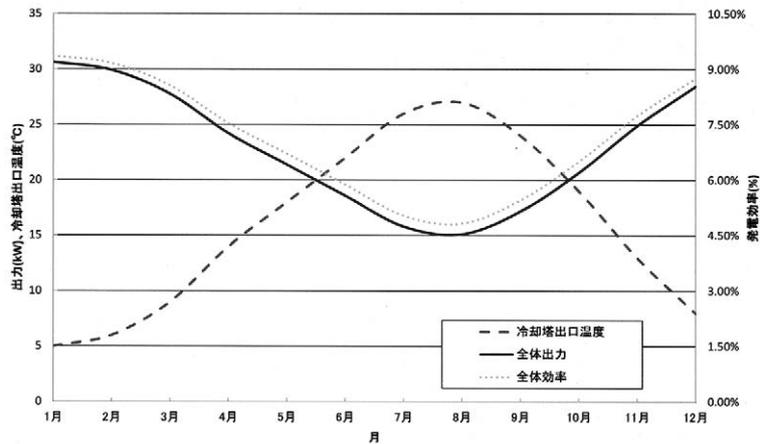


図4 季節変動による性能変化

(4) 冷却水の影響検討

本システムにおける試験では、タービン入口条件は季節変動に関わらず一定に制御しているが、タービン出口条件は、同変動による外気温の変化に伴い冷却水入口温度も変化するため、発電出力にも直接影響を与える。このため、冷却水入口温度が与える発電出力（効率）への影響について検討を行った。年間の季節変動による出力変化を図4に示す。

冷却塔出口温度（＝冷却水入口温度）が下がると、全体効率、全体出力は向上し、逆に冷却塔出口温度（＝冷却水入口温度）が上昇すると、全体効率、全体出力は低下する。6月～9月中旬までは、冷却塔出口温度が設計条件（20℃）より高い値となるため発電出力は20kWを下回るが、冬場は逆の傾向から30kW程度まで出力向上が見込めるため年間を通じての平均発電出力は23kWとなり、20kWを確保できる見通しを得た。

4. 発電システムの製作および運転試験

(1) 発電システム要素技術

全体系統は、高圧段および低圧段それぞれに蒸発器、タービン発電機、凝縮器、循環ポンプで構成されている。図5に高圧段発電システムの鳥瞰図を示す。低圧段も同様の構造であり、熱水については高圧段、冷却水については低圧段で使用したものが後段にシリー

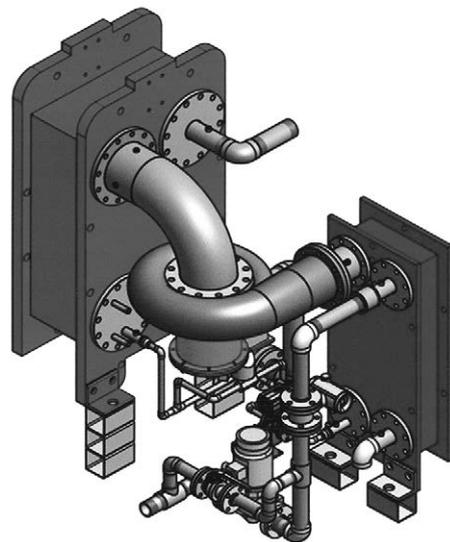


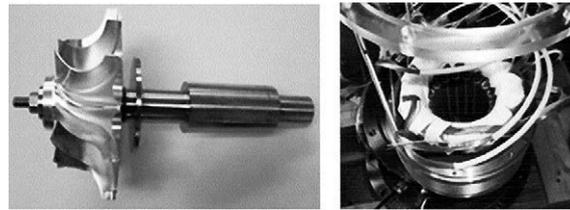
図5 高圧段発電システム

ズに流れて利用される。現地工事の簡略化および低コスト化のため各機器のコンパクト化を行い、パッケージ化して試験装置全体として40ftコンテナに収めることを可能にした。

① タービン発電機

本システムにおけるタービンとしては、高速ラジアルタービンを採用したことおよびその概要は第2章第3節で述べた。高圧段および低圧段タービンの外観を図6に示す。

発電機は、蒸気や水に曝されるので、巻線の絶縁および回転ロータの耐水・耐蒸気性が必要である。このため、ロータは水等で腐食しづらい材料を使い、巻線は、被覆絶縁した



タービン発電機

発電機ステータ

図6 タービン発電機

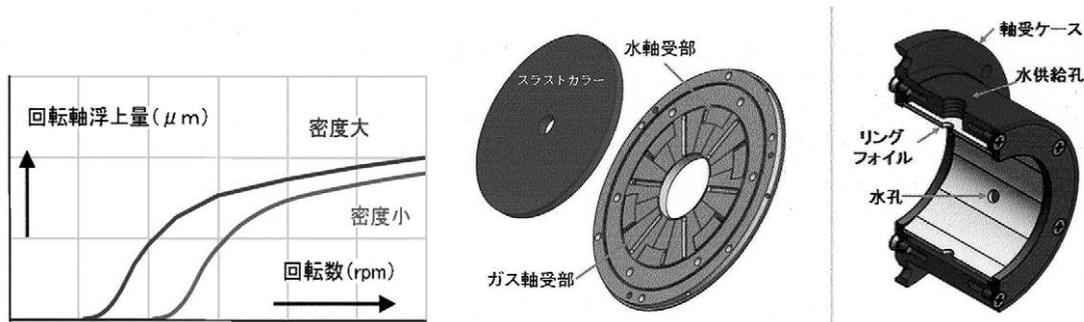


図7 水蒸気ハイブリッド軸受

ものを使用して製作した。巻線は、アルミ線、メッキ銅線、単線、撚線の中から選んで使用できるものとし、今回の開発では、メッキ銅線に被覆を施したものを使用した。

② 水・蒸気ハイブリッド軸受

本システムの特徴の1つとして水・蒸気ハイブリッド軸受を採用したことを述べたが、水・蒸気ハイブリッド軸受は、起動から低速回転域において密度の高い潤滑水による高い浮上能力、負荷能力を有する水潤滑軸受を主体とし、高速域では、密度、粘度の低い蒸気を利用するガス軸受として働くものである。

また、高回転域では、軸方向圧力差（スラスト軸受のカラー両面の差圧）が大きくなるため、スラスト軸受（ガス軸受）を構成するスラストカラーに作用するガス圧を自動的に制御する構造を採用し、軸受にかかるスラスト力を軽減する構造としている。水・蒸気ハイブリッド軸受の概念図を図7に示す。

③ 熱交換器

これも本システムの特徴として紹介したもの

であるが、蒸発器、凝縮器については、高い伝熱性能と低圧力損失を同時に達成可能なプレート式熱交換器を採用している。プレート式熱交換器を図8に示す。伝熱プレートは、種々の突起や溝を設けて強度と表面積を増やし、伝熱係数が非常に高く、高温流体と低温流体が交互に流れる構造となっている。プレート式熱交換器は容易に分解可能で、伝熱面積の増減および伝

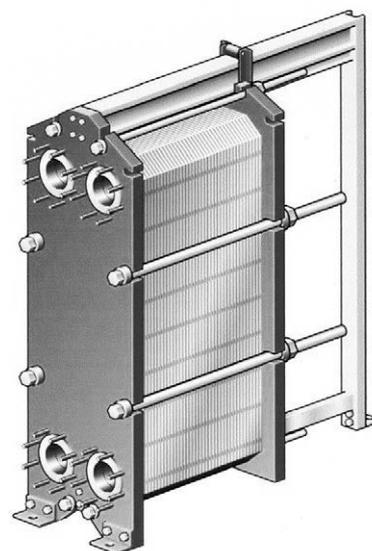


図8 プレート型熱交換器

熱面の清掃も可能である。プレート周囲の溝にはガスケットを装着しているため、流体のシール性も極めて高い。

④ その他設計配慮点

本システムは、前述のとおり作動媒体に水を採用しており負圧雰囲気中で加熱蒸発する必要がある。このため、真空維持することが安定運転するには重要である。同対策として、各機器、弁類等は、真空維持が可能なものを採用した。次にその一例を示す。

- ・循環ポンプにマグネット式ノンシールタイプを採用
- ・バルブはベローズ弁を採用
- ・配管の継手部に溶接接続を採用
- ・流量計に非接触式を採用

(2) 運転試験結果

前節で製作した発電システムのうち高圧段運転試験結果を図9に示す。試験用温水ボイラからの温水で加熱を行うと、蒸発器出口

(=タービン入口)の媒体蒸気温度と圧力が高まり、飽和蒸気線の設計温度に到達後、タービン入口圧の上昇は緩やかになり、温度が急激に上昇、乾き蒸気となっている。乾き蒸気となった後に、急激に出力が上昇し、目標出力12kWを達成した。同様に、低圧段運転試験を行ったが、タービン入口温度52.8℃で出力8kWを上回り、設計条件で全体目標出力20kWを達成し、また発電効率5%以上を達成していることを確認した。

5. 実用機設計と経済性検討

(1) 実用機概念設計

将来のコスト目標達成のためには、より徹底したコスト低減が必要であり、そのため実用機(50kW級)では、高圧段・低圧段を2軸2段構造から1軸2段構造にした検討を行った。両者の比較検討を表6に示す。1軸2段構造にすることで重複する機器を削減し、コスト低減を狙った。

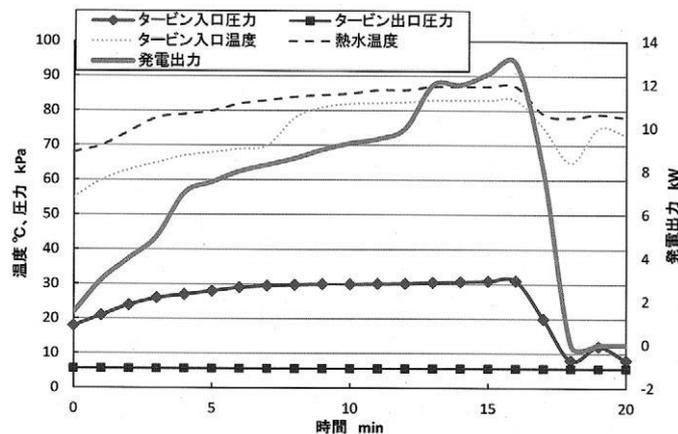


図9 高圧段試験結果

表6 2軸2段構造と1軸2段構造の比較

形式	メリット	デメリット
2軸2段構成	設計自由度高い	発電機、軸受ケース、軸受、コンパタータが2台必要
	各段最適化可能	
	回転方向が自由に選定可能	
	スクロールや動翼の共用化可能	
1軸2段構成	発電機、軸受ケース、軸受、コンパタータが1台分に削減可能	高圧段と低圧段の回転が同方向であり、動翼やスクロールの共用化が困難
	本体・配管等のコンパクト化	

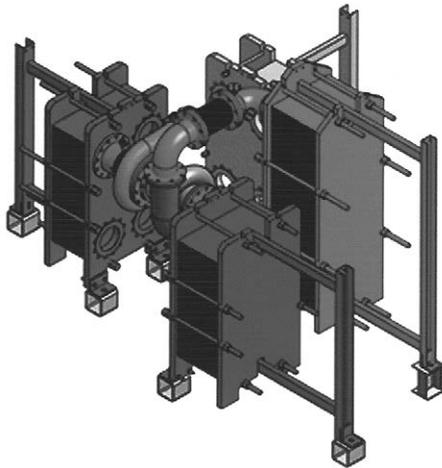


図 10 1軸2段構造

1軸2段構造の外観を図10に示す。タービンの回転軸方向に2台の凝縮器を、タービンの側面に2台の蒸発器を備えたコンパクトな構成となっている。また、発電機の両端に高圧段タービン、低圧段タービンを配置し、両タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに転換し電力を取り出している。

同機は、本研究の当初目標に入ってなかったものであるが、将来実用化時のコスト低減の検討の中で提案し、試験機20kW級の製作と試験を行ったものである。限られた時間と設備制約の中で試験を行ったこともあり、発電出力13kWを得るに留まった。しかし、同方式の原理検証の役割は充分達成したと考える。

(2) 経済性に関する見通し

① 規制緩和の動向⁽³⁾⁽⁴⁾

これまでのバイナリー発電では、発電効率が低く、出力当たりの設備コストが高いため、経済性が劣るといった課題があった。しかし、2012年7月より施行された固定価格買取制度(以下、FIT)で、15,000kW未満の中小規模

の地熱発電による電力買取価格が40円と設定されたこともあり、バイナリー発電全体として事業性が大きく向上した。固定価格買取制度のうち地熱の買取価格を表7に示す

さらに、小規模のバイナリー発電では、特に経済性が重視されるためボイラー・タービン主任技術者の設置に係る費用が問題とされていたが、2012年度にバイナリー発電システムに関し、一定条件を満たせば(出力300kW未満、不活性媒体(二酸化炭素、フルオロカーボン等例示有り)等)、これまで必要とされたボイラー・タービン主任技術者の選任不要、工事計画届出不要等の規制緩和が認められた。同制度は、今後小型のバイナリー発電設備の導入を後押しするものとして期待される。表8にバイナリー発電に関する規制緩和を示す。

本システムで用いる水は、表中の例外措置媒体の例示には明記されていないが、その趣旨から当然規制緩和対象と理解される。一方、ペンタン等の炭化水素、アンモニア、水アンモニア混合物は、可燃性等の観点から今回の規制緩和対象から見送られている。このように本システムは、実質的に環境面で安全であるのみならず、規制緩和によるコスト面での有利性も考えられる。

(3) 経済性試算

本研究の目的は前述の通り、低温熱源を用いた従来型発電の様々な課題を克服し、環境面と経済面の両面で優れた新規発電技術を開発することにある。このような新技術が導入・普及するためには、湯量の確保や地域住民対応に加えて、事業者(設備ユーザー)に対する経済的メリットがあるかどうか重要な因子となる。

表7 固定価格買取制度(地熱)

設備容量	15,000kW以上	15,000kW未満
調達価格	26円+税	40円+税
調達期間	15年間	15年間

(出所:資源エネルギー庁ホームページ, なっとく再生可能エネルギー)

	出力条件等	保安規定 作成・届出	主任技術者選任		工事計画 届出	定期安全 管理検査	浴槽安全 管理検査
			電気	BT			
見直し前	-	要	要	要	要	要	要
見直し後	以下の全ての条件を満たす場合 ・発電出力300kW未満 ・最高使用圧力2MPa未満 ・最高使用温度250℃未満 ・タービン等の駆動部が発電機と一体のものとして一の筐体に収められているもの、その他の一体のものとして設置されるもの ・タービン等の駆動部の破損事故が発生した場合においても、破片が当該設備の外部に飛散しないように設置されるもの ・熱源(一次系)が専ら輻射熱又は大気圧において100℃以下の熱水・蒸気 ・媒体が不活性ガス(一般高圧ガス保安規則に規定するもの【ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン、窒素、二酸化炭素又はフルオロカーボン(可燃性のものを除く。)】に限る) ・一般公衆が窒息(酸欠)しないための構造	要	要	不要	不要	不要	不要

(出所：経済産業省ホームページ、バイナリー発電設備の規制の見直しに伴う電気事業法施行規則等の一部改正等より作成)

表8 バイナリー発電に関する規制緩和

本項では、設備ユーザーとして、温泉等の熱源を有する事業者を想定し、本技術を導入することによって得られる経済的メリットをFITにおける売電事業を行った場合の事業性について試算した。ここでは、設備ユーザーが熱源を有していると想定するため、新規発電事業者に必要なとされる土地利用に関わるコストや熱源の掘削や利用に関わるコストは考慮しない。

発電コストを占める重要な因子として、発電システムの建設費が挙げられる。建設費の範囲には高速タービン発電機と低圧損コンパ

クト熱交換器を主要機器とする二段水バイナリー発電システムに加えて、冷却塔、各種ポンプなどの補機が含まれる。現在のところ、50kWの実用機における主要機器および補機設備費、運搬費、設置費用を含めた総建設費は5,000万円(100万円/kW)と見積もられるが、量産化効果を考慮することにより、本技術のコスト低減目標は2,500万円(50万円/kW)である。

現状レベルの5,000万円の建設費において、FIT制度を利用して事業を行った場合の経済性試算結果を図11に示す。各項目の発電経

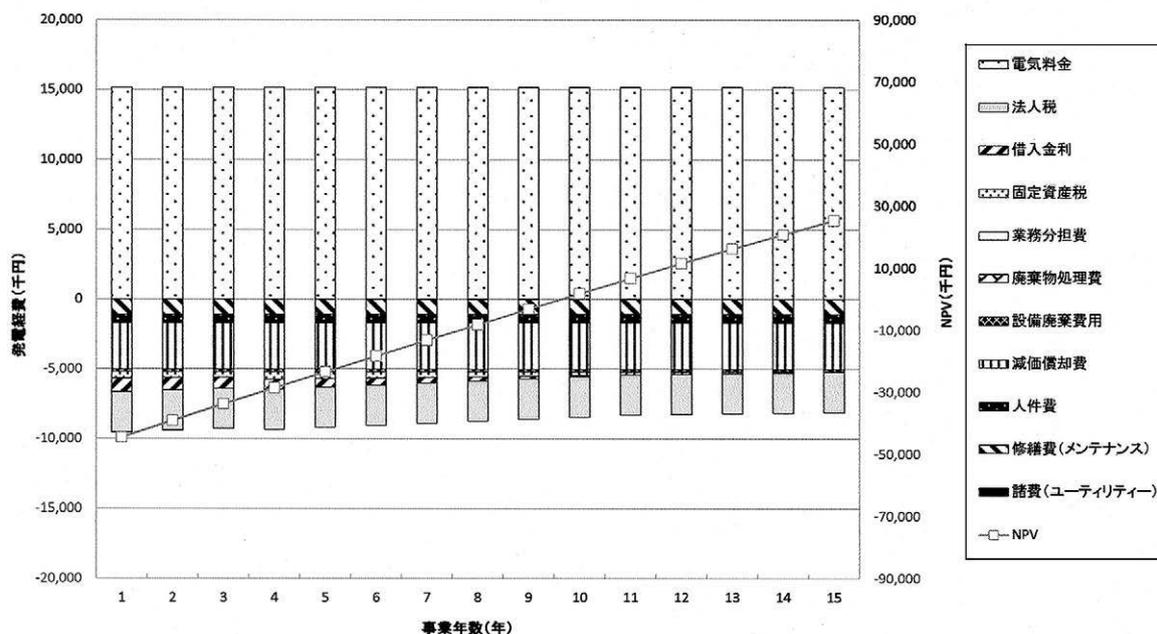


図11 経済性試算結果(総建設費5,000万円, FIT売電ケース(40円/kWh))

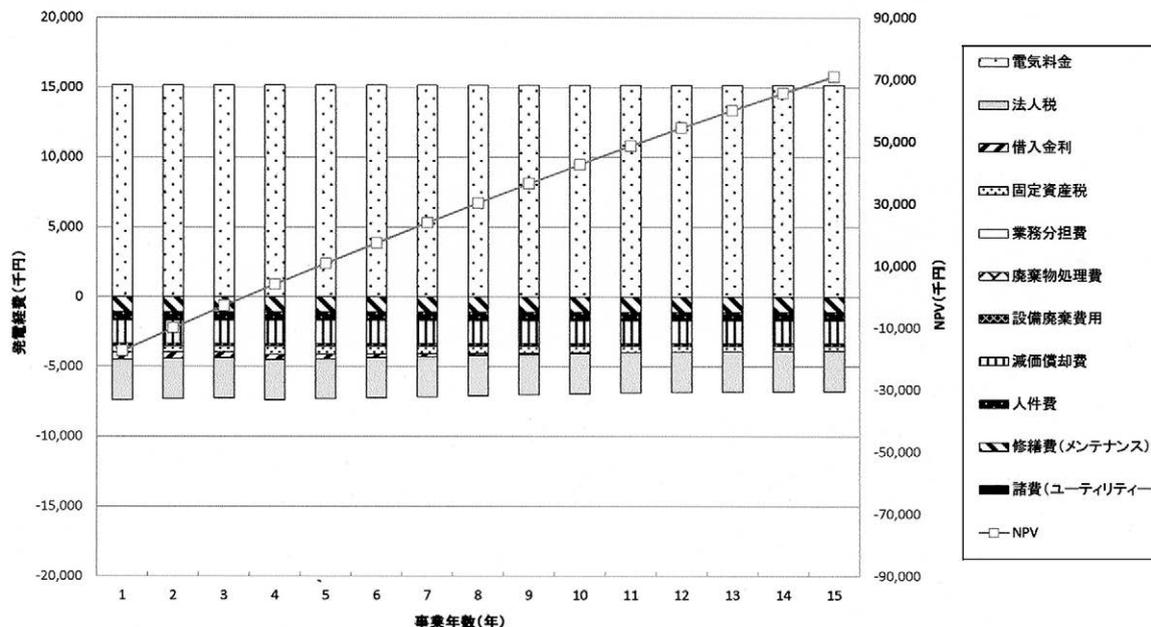


図 12 経済性試算結果（総建設費 2,500 万円，FIT 売電ケース（40 円／kWh））

費に占める割合を見ると、減価償却費が最も多いが、次いで法人税が多くなっている。法人税は売電収入と発電経費の差分（≒利益）に応じて決まるため、法人税が高いということは利益の高い事業であることが伺える。正味現在価値（以下、NPV）のカーブについて見ると、右上がりになっており、10年目で値がプラスに転じる。また、事業開始後15年経過した時点における内部利益率（以下、IRR）は8%であったことから、事業の成立可能性が高いと思われる。

一方、同じく目標の建設費 2,500 万円が達成でき、さらに FIT 制度を利用して事業を行った場合の経済性試算結果を図 12 に示す。NPV の傾きが高く、事業性が良いことがわかる。投資回収に予想される期間は 4 年間であり、事業開始後 15 年経過した時点における IRR は 34% であった。事業性は非常に高いことが伺える。このケースでは、FIT の買取期間が終了し、売電価格が低下することを想定しても、設備の減価償却も終わっており、必要経費も安価であるため、事業が成立すると考えられる。

6. まとめ

本稿は、水を作動媒体としたバイナリー発電システムの設計、製作、検証を行い、その成果の一部を紹介した。具体的には、高圧段試験にて 12kW、低圧段試験にて 8kW の合計出力 20kW を達成し、各段の効率から全体発電効率 5% 以上達成を確認し、効率面および環境面で優れた可能性を有していることを見出した。

さらに、小型高効率タービン、水・蒸気ハイブリッド軸受、耐水性に強い発電機等の技術開発を行うとともに、蒸発器と凝縮器に用いる高効率熱交換器の開発も行い、各要素技術の優れた性能を有することも確認した。

さらに将来のコストダウンを狙って 1 軸 2 段方式の原理検証試験にも成功した。しかし、実用機（50kW）の場合は、今後さらなる検証、耐久性等の完成度向上に向けた研究開発が必要である。

低温未利用熱の有効利用策として、本システムは地球温暖化対策あるいはエネルギー利用効

率向上に資する技術と考えている。今後一層関係者各位のご理解とご協力を期待したい。

[謝辞]

本稿作成にあたり環境省からの委託事業「地球温暖化対策技術開発・実証研究事業（環境適合型・高効率バイナリー発電の技術開発）」の成果を利用させていただいた。環境省のご関係者に深甚なる謝意を表す。

また、同研究開発においては、有識者からなる技術開発委員会（委員長：吉識晴夫東京大学名誉教授）が設けられ、研究の推進、評価、問題解決等に対するご指導を頂いた。委員長をはじめ委員の先生方にも、この席をお借りして謝意を表す。

さらに、本研究の推進にご尽力頂いた石田敬一・元エネルギー総合工学研究所研究員（現中国電力㈱、柳井発電所メンテナンスグループ電気1担当）および森山亮・主管研究員にも謝意を表す。

参考文献

- (1) 環境省, 地熱発電事業に係る自然環境影響検討会
http://www.env.go.jp/nature/geothermal_power/conf/h2301/mat02.pdf
- (2) 環境省, 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査, 平成 23 年 3 月
- (3) 資源エネルギー庁, なっとく再生可能エネルギー
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html
- (4) 経済産業省, バイナリー発電設備の規制の見直しに伴う電気事業法施行規則等の一部改正等について
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2012/04/240417-2-5.pdf

米国と中国の IGCC の現状

※
小野崎正樹 (理事・プロジェクト試験研究部
部長)



※※
坪井 繁樹 (プロジェクト試験研究部
主管研究員)

1. 背景

化石資源の有効利用と二酸化炭素（CO₂）排出量削減の観点から、火力発電では発電効率の向上を目指している。石炭火力にあっては、天然ガスに比べて単位発熱量当たりのCO₂発生量が多い石炭を燃料とするので、効率向上とともに、発生するCO₂を回収し貯留するCCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）が検討されている。発電効率向上の発電方式として石炭ガス化複合発電（IGCC）が開発されており、世界で実証、商業機が運転されてきた。IGCCは微粉炭火力（PC）に比べてCO₂の回収に要するエネルギーが少なく、そのための発電効率の低下が少ない。今後、CO₂回収が必要になることを踏まえると、IGCCの導入・普及のメリットが大きい。

日本では、常磐共同火力勿来発電所で空気吹

きIGCCが商業機として運転しており、また、広島県にある中国電力大崎発電所では酸素吹きIGCC実証機が建設中である。さらに、福島では2020年運転開始を目指して500MWのIGCC建設する2プロジェクトが進行中である。

本稿では、IGCCについて、世界の状況を概説し、特に、日本以外で近年IGCCが新設された米国と中国の状況を中心に報告する。

2. IGCC の状況

IGCCの大型実証および商業運転は、1990年代から本格的に進み、世界では表1に示す300MW規模の4プロジェクトの運転が継続された。この内、オランダ、Buggenumのプラントは運転を停止し解体中である。また、米国の2プラントは、いずれも1990年代に米国エネルギー省（DOE）の補助を得て建設、運

表1 世界の主要な先行IGCCプロジェクト

プロジェクト名	運営会社	国、州	ガス化炉	ガスタービン	発電端 (送電端) 出力 MW	運転開始	備考
Buggenum	Nuon (Vattenfall)	オランダ	Shell (酸素吹き)	Siemens V94.2 1100℃級	284 (253)	1994年1月	2013年3月 運転停止
Wabash River	Wabash Valley Power	米国 インディ アナ州	E-Gas (Dow) (酸素吹き)	GE 7FA 1300℃級	296 (262)	1995年8月	石油コークス を使用
Polk Power	Tampa Electric	米国 フロリダ州	GE (Texaco) (酸素吹き)	GE 7FA 1300℃級	315 (250)	1996年7月	石油コークス と石炭を使用
Puertollano	ELCOGAS	スペイン	Prentlo (酸素吹き)	Siemens V94.3 1300℃級	318 (283)	1997年11月	

転し、途中から、値段の安い石油コークスを燃料に用いて運転がなされている。

2010年代にはCO₂削減を意図して、各国で再びIGCCの建設が始まった。表2に示すように、日本では、クリーンコールパワー社(CCP)が常磐共同火力勿来発電所(福島県いわき市)内に三菱重工の技術による250MW(発電端)の実証機を建設し、2013年7月から運転を開始、3,917時間の連続運転に成功した⁽¹⁾。1200℃級のガスタービンであるが、発電端効率で46%(HHV)、送電端効率で40.5%(HHV)の設計値を達成している。2013年7月からは、常磐共同火力の勿来10号機として商業運転中である。また、瀬戸内の島、広島県大崎上島では、中国電力とJ-Power社の出資による大崎クールジェン社が166MW(発電端)の実証機の建設を開始し、現在、2017年

運転開始に向けて据え付け工事が進んでいる。J-Power社が同社若松研究所で開発してきたEAGLEの技術を採用している。さらに、常磐共同火力勿来発電所と東京電力広野火力発電所(福島県双葉郡)にMHPS(三菱日立パワーシステムズ)の空気吹き技術による500MWIGCC建設計画が進んでいる。同社はIGCCのシステムにPHOENIX(フェニックス)IGCCと命名し営業活動を行っている。

米国では、Duke Energy社がインディアナ州Edwardsportで761MW(発電端)のIGCCを建設し運転を開始した。また、Southern Company(SC)社がミシシッピ州Kemperで524MW(送電端)のCCUS付IGCCを建設中である。さらに、Summit Power社がTexas Clean Energyプロジェクトを、Hydrogen Energy California社が発電と水素を製造し

表2 世界の新規IGCCプロジェクト

プロジェクト名	運営会社	国, 地域	ガス化炉	ガスタービン	発電端(送電端)出力 MW	運転開始, 進捗状況	備考
GreenGen	中国華能集团公司	中国, 天津	西安熱工学院(酸素吹き)	Siemens SGT2000 E	265 (225)	2012年12月	CO ₂ 回収の計画あり
勿来10号機	常磐共同火力	日本, 福島	MHI※1(空気吹き)	MHI※1 701DA 1200℃級	250	2013年7月	2013年4月にCCP※4を吸収合併
Edwardsport	Duke Energy	米国インディアナ州	GE (Texaco)(酸素吹き)	GE 7FB 1370℃	761 (618)	2013年6月	CO ₂ 回収の計画あり
Kemper	Mississippi Power (Southern Company)	米国ミシシッピ州	TRIG(空気吹き)	Siemens SGT6-5000 F	(524)	2015年5月予定	CO ₂ 回収65%
Taeon	KOWEPO	韓国 Taeon	Shell(酸素吹き)	GE 7FB 1370℃	380	2015年運開予定	
大崎クールジェン	大崎クールジェン	日本, 広島	バブコック日立(酸素吹き)	MHPS※2(日立) H-80 1300℃級	166	2017年実証試験開始予定	
Texas Clean Energy	Summit Power	米国テキサス州	Siemens(酸素吹き)	Siemens SGT6-5000 F	400	FEED※3完了	CO ₂ 回収90%
Hydrogen Energy California	Hydrogen Energy California	米国カリフォルニア州	MHI※1(酸素吹き)	MHI※1 501GAC 1500℃級	(300)	FEED※3完了	CO ₂ 回収90%
勿来発電所	常磐共同火力	日本, 福島	MHPS※2	MHPS※2 1500℃級	500級	計画	
広野火力発電所	東京電力	日本, 福島	MHPS※2	MHPS※2 1500℃級	500級	計画	

※1 三菱重工株式会社 ※2 三菱日立パワーシステムズ株式会社 ※3 基本設計業務 ※4 クリーンコールパワー

(出所：常磐共同火力ホームページを参照し、最新情報を追加し作成)

ンモニア、尿素を製造するプロジェクトを立ち上げ、FEED (Front End Engineering Design)、いわゆる基本設計が終わった段階にある。4プロジェクトの内、Edwardsportを除き、回収したCO₂は石油増進回収 (EOR: Enhanced Oil Recovery) に使用される。

一方、中国では、多くの石炭ガス化炉が稼働しており、合成ガスの一部を発電に回していることはあったが、全面的なIGCCとしては、中国華能集团公司のGreenGenプロジェクトが最初である。

3. 米国におけるIGCCの動向

(1) 電力の状況

米国では、2008年頃からシェールガスの生産が急増し、国内の天然ガス価格が7～12米ドル/MMBtu(発熱量100万Btu当たりの値段)から5米ドル/MMBtu以下に低下し、石炭の価格に近付いた。天然ガス火力の運転負荷が上がり、石炭火力の発電量におけるシェアは50%程度から2013年には37%に低下した⁽²⁾。そのような状況を背景に、2013年6月オバマ大統領は気候行動計画 (Climate Action Plan) を発表し、その中で新設発電所のCO₂排出規制の方針を打ち出した。これを受けて、米国環境保護庁 (EPA) は、2013年9月に、新設火力発電所ではCO₂排出量を1,100ポンド/MWh (500kg/MWh) 以下に規制する案を発表した。この規制値は天然ガス火力における排出量である1,000ポンド/MWh (450kg/MWh) 程度と同等で、石炭火力では達成不可能な数値である。

さらに、2014年6月には、EPAは2030年までに既存の600程度ある火力発電所からのCO₂排出量を2005年比で30%削減する案を発表し、各州は2016年6月までに順守計画をEPAに提出することを求めた。

米国の石炭火力は1970年代に建設されたものが多く、今後、急速に停止する発電所が増えることが予想される。その分を全面的に天

然ガス火力とするのか、CCUSを設置して米国に豊富に賦存する石炭を使い続けるかが問われる。

(2) Edwardsport IGCC プロジェクト

インディアナ州Edwardsport (Knox County) にDuke Energy社が保有している160MWの微粉炭火力3基 (1944～1951年運開) を、618MW (送電端) のIGCCにリプレースするプロジェクトである。地元の石炭を使用し石炭ガス化炉にはGE炉2系列を採用している。

建設費は2007年試算の19.85億米ドル、2008年に許可を得た23.5億米ドルに対して35億米ドル (1米ドル=108円として3,800億円) (kW当たり5,700ドル) に上昇した⁽³⁾。2013年6月に運転を開始したが、機械トラブルにより稼働率が低迷しており、2014年5月現在ではガス化炉を用いた複合運転に至っていない⁽³⁾。また、CCSについては、EORへの利用あるいは枯渇ガス田、油田への導入などを検討してきたが決まっていない。

(3) Kemper IGCC プロジェクト

① プロジェクト概要

米国南部6州の電力を賄っているSouthern Company社 (SC社) がミシシッピ州Kemper郡にIGCCプラントを建設中である。石炭ガス化炉にはTRIG (Transport Reactor Integrated Gasifier) と言う高速循環流動床ガス化技術を用いている。SC社と石油精製分野で有数のエンジニアリング会社であるKBR社が、米国エネルギー省 (DOE) の補助を得て開発した技術である。

プラントサイトに隣接した炭鉱で採掘するミシシッピ褐炭を使用する524MW (送電端) の新設発電所である。2010年6月に建設を開始し、当初のスケジュールより1年遅れの2015年5月に運転開始の予定である。

② TRIG 技術⁽⁴⁾

KBR社が有する石油精製で用いる流動接触

分解 (FCC) 技術をベースに、1996 年から SC 社他と共同で石炭ガス化の試験装置である PSDF (Power Systems Development Facility) をアラバマ州 Wilsonville に建設し、2008 年まで米国 DOE の補助を得てガス化試験を行ってきた。

TRIG は、高速循環流動床形式のガス化炉で「トランスポトリクター」と呼ばれている。図 1 に示すように、ガス化のためのライザー下部からバーナー無しで石炭粒子を導入する。粒径は 500 μ 、80% パスで、微粉炭に比べかなり粗い。水分の高い低品位炭では、20% 程度に乾燥して導入する。ガス化炉出口のガスは 2 段のサイクロンで粒子が分離され、灰やチャーなどの粒子はスタンドパイプを通してライザー部に戻る。

燃料には、褐炭、亜瀝青炭などの低品位炭を想定している。また、KBR 社は酸素吹きで化学用途の合成ガス製造を、SC 社は空気吹きで IGCC 用途を目指している。

ガス化炉内の温度は灰が溶融しない 1,000°C 以下の比較的低温とし、その結果、耐火材の長寿命化、下流の汚れ低減が図れる。ガス化炉出口ガスは 1,700°F (927°C) 前後で、シェルアンドチューブ形式の廃熱回収装置 (syngas

cooler) で 750°F (399°C) 程度に下げる。

灰の払い出しは、ガス化炉下部から灰を抜き出す CCAD (continuous coarse ash depressing) とフィルターで除去した灰を抜き出す CFAD (continuous fine ash depressing) の 2 カ所から行う。PSDF では、約 20,000 時間の運転実績があり、その間に改良を重ねて信頼性を高めてきた。

③ プラントサイト

プラントサイトはミシシッピ州の北部の Kemper 郡にあり、近隣の町から車で 30 分ほどのなだらかな丘陵地帯である。新たに開発した褐炭の炭鉱が隣接しており、採掘した石炭をサイトまでトラックで輸送する。

発電所で発生する CO₂ の 65% を回収し、約 100km のパイプラインを新設して、テキサス州で EOR に用いるための既設 CO₂ パイプラインに接続する。年間で 340 万トンになる。また、バックアップおよびスタートアップ用天然ガスは、既設のパイプラインから約 8 km 新設して導入する。このように、基本的なインフラが近隣に備わっていることが、この地を選択した最大の理由であろう。また、CO₂ の他に硫酸とアンモニアが副産物として販売される。

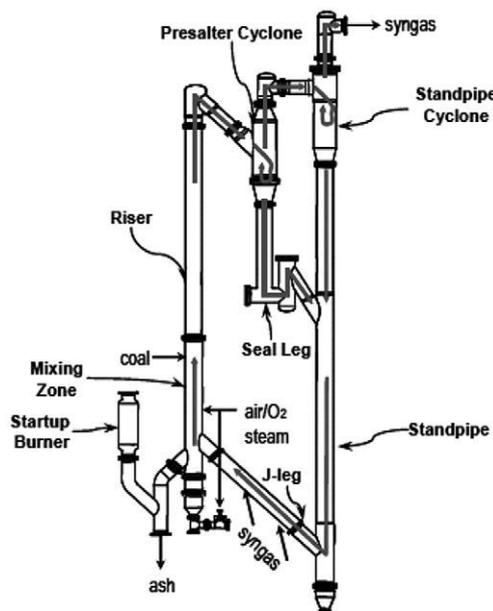


図 1 TRIG (5) のイメージ

④ プラントの仕様

Kemper IGCC プラントの仕様を表3に示す。送電端の発電効率はCO₂回収が無くとも36%と低いのは水分が45.5%の褐炭を使うため、CCUSによりさらに8ポイント低下する。

図2に2013年12月に筆者が撮影したプラント全景写真を示す。石炭乾燥工程から石炭粒子

供給系が6系列（予備2系列を含む）、ガスタービン系統が2系列になっているのがわかる。

⑤ 石炭ガス化炉

TRIGの核となる石炭ガス化炉はトランスポートリアクターと呼ばれ、先述のようにFCC技術がベースとなっている。PSDFでは

表3 Kemper IGCC プラントの主な仕様

建設地	米国ミシシッピ州 Kemper 郡
出力	送電端； 通常 524MW, ピーク時 582MW (天然ガス焚を含む)
送電端効率	28.1% (HHV, CO ₂ 回収有り) 36% (HHV, CO ₂ 回収無し)
石炭	ミシシッピ褐炭；水分 45.5wt%, 灰分 12wt%, 硫黄 1wt%, 発熱量 2572kcal/kg (LHV)
系列	石炭乾燥機；2系列（各系列に予備機を含めて3基）, 石炭ガス化炉, ガス精製, ガスタービン, スチーム回収ボイラー；2系列, スチームタービン, アンモニア製造, 硫酸製造, 冷水塔など；1系列
石炭乾燥	独自に開発した流動床式乾燥機で20%水分まで乾燥
CO ₂ 回収	Selexol 法, 340万トン/年
硫酸	WSA 法, 13.5万トン/年
アンモニア	アンモニアスクラバーにより回収, 2.2万トン/年
水銀除去	硫黄含浸アルミナ吸着剤
建設費	当初の24億米ドルから2014年4月, 約55億米ドルに上昇



(撮影：小野崎)

図2 Kemper IGCC 全景写真

表4 Kemper IGCC プラントと PSDF のガス化炉の比較

	Kemper IGCC	PSDF
ガス化炉ライザー部の直径 (mm)	1800	360
高さ (mm)	45,700	30,500
圧力 (MPa)	4.4	0.8 ~ 1.8
温度 (°C)	930 ~ 1,100	830 ~ 950
石炭供給量 (t/h) (1 系列当たり)	263 (水分 18%)	1.2 ~ 2.2 (湿炭)
PSDF との断面積比	25	1
PSDF との高さ比	1.5	1

石炭処理量が2t/h程度で試験を行ってきたが、表4に示すように、Kemper IGCCでは、1系列当り、263t/hと、一気に100倍以上ものスケールアップを行っている。化学工学の視点では一見、無謀とも言える倍率であるが、FCCのライザーと呼ばれる触媒を流動している反応器の直径が1,800mmまで実績があり、流動状態を把握していることから、Kemper IGCCでもそのサイズにしたとのSC社の説明である。断面積が25倍、高さを約1.5倍、圧力が約4倍を掛け合わせると、ガス相の滞留時間は150倍になることから領ける。その時のガス化炉周りのイメージは図3の通りである。

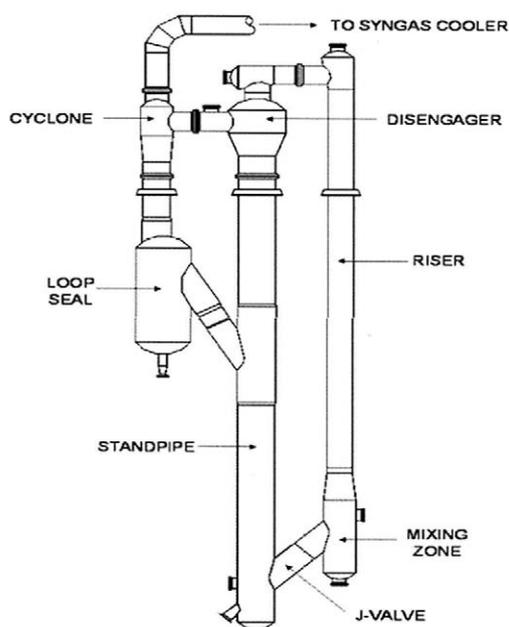


図3 Kemper IGCC 用石炭ガス化炉のイメージ⁽⁶⁾

(4) IGCC の経済性

Edwardsport プロジェクトの建設費は35億米ドルで、kW 当たり直すと5,700ドル（1米ドル=108円として62万円/kW）であった。Kemper プロジェクトでは、当初24億米ドルが最終的には55億米ドルと見込まれる。kW 当りでは当初4,600米ドル、最終的に10,500米ドル（1米ドル=108円として110万円/kW）である。シェール革命の影響による労務費高騰や設計ミスなどが要因で建設費が倍以上に上がったとのことであるが、それにしても高いと言わざるを得ない。

一方、NETLの報告書⁽⁷⁾では、CCUS付きの場合、GEのIGCCが3,800米ドル/kW、Shellが4,500米ドル/kWと想定している。この時、発電コストはそれぞれ106mills/kWhと119mills/kWh（1米ドル=108円として、各々11.4円/kWh、12.9円/kWh）で、微粉炭火力にCCUS付きのケースでは107～110mills/kWhと比べて同程度である。一方、天然ガス複合発電の場合の発電コストは60mills/kWh程度である。

Kemper プロジェクトのようにCO₂をEOR用に販売する場合、CO₂トン当たり20米ドルの時、年間収入は6800万米ドル、20年間では13.6億米ドルとなる。当初の建設費24億米ドルの56%、最終建設費55億米ドルの25%の収入であり経済性向上に大きく貢献する。今後、複数のIGCCを建設するに従い建設費が大き

く低下し、さらにCO₂販売価格が上がると経済性を有するプロジェクトになる。

4. 中国におけるIGCCの動向

(1) IGCCの経緯

1944年3月に旧国家計画委員会（現 国家発展改革委員会）および旧国家科学技術委員会（現 科学技術部）により設立された「中国21世紀アジェンダ管理センター」が、「中国21世紀アジェンダ」を発表した。その中で、はじめてIGCC発電技術の研究を重点プロジェクトとして指定し、IGCC実証発電プラントの建設、海外設備の導入、国内での設備の部分研究・製造などの内容が盛り込まれた。同プロジェクトの期間も1995年から2000年と定められ、1994年5月には幾つかの行政機関からなる「IGCC国家指導チーム」が、また同年6月には国内企業、研究機関からなる「IGCC研究チーム」が立ち上げられた。1996年から「山東省煙台IGCCプロジェクト」のフィージビリティ・スタディ（FS）が開始された。その結果、1997年には山東省煙台発電所がIGCC実験プラントの実施主体として選定された。2001年1月には調印式まで実施され、計画では400MWのモデルプラントを2003年に建設開始して、2006年に稼働する予定であったが未だ着工されていない。

一方、5大発電事業者はIGCC技術の研究・開発に意欲を示し、幾つかのIGCC実証プラントが計画された。その中でGreenGenプロジェクトのみが実施された。2005年12月に5大発電事業者、2石炭事業者および国家開発集团公司の共同出資によりGreenGen Co.（綠色煤電有限公司）が設立された。その中でも中国華能集团公司が51%の出資を占めており主導的立場にある⁽⁸⁾。計画は3段階に分かれており、現在完了した第1段階は2006年着工2009年完成予定であったが、2009年7月6日に着工され、2012年12月13日に正式稼働した。

(2) GreenGenプロジェクト

① プロジェクト概要

プラントサイトは図4に示すように天津市内の塘沽区臨港工業区の一角である。出力は公称250MW(発電端265MW、送電端225MW)で送電端発電効率は41%である。実施主体は前述の綠色煤電有限公司が75%で、天津市津能投資公司（天津市管轄のエネルギー開発会社）が25%を出資している。プロジェクト費用は、IGCC発電所の範囲で22億元（1元＝16円として352億円）と言われている⁽⁹⁾。

建設主体は華能クリーンエネルギー研究所（HCERI：Huaneng Clear Energy Institute）という中国華能集团公司がGreenGenプロジェクトを実行するために設立したグループ会社



図4 GreenGen設置場所⁽¹⁰⁾

である。西安熱工学院からIGCCおよび循環流動床ボイラー部門が中国華能集団会社の資本により分離独立した会社で、総勢約150人体制で、GreenGenプロジェクトの全体管理と基本設計、エンジニアリング、ガス化炉のプロセス設計および運転指導を担当している。機器については、Siemens社製のガスタービン以外は全て中国製で、ガス化炉は上海ボイラー社、スチームタービンは上海電気社、空気分離装置は開封空分集団、排熱回収ボイラーは杭州ボイラー社の製作である。

GreenGenプロジェクト全体のブロックフローシートを図5に示す。現状(第1段階)では、合成ガスをシフト反応した後のガスからのCCUSおよび燃料電池設置によるIGFC(Integrated Gasification Fuel Cell)は未実施で

計画中(第2段階、第3段階)である。CCUSについては、CO₂回収は実績のある化学吸収法を検討しており、回収CO₂は勝利油田へトラック輸送し、EORとして利用する計画と聞いている。またIGFCの燃料電池はMCFC(Molten Carbonate Fuel Cell、熔融炭酸塩型)の50kWクラスを研究中とのことであった。

プラント全体のイメージを図6に示す。200mから300m離れた隣接地に天津渤海化工の工場があり、石炭ガス化炉(Shell炉)が2基設置されている。原料石炭は近隣のドーム型貯炭場よりバルチコンベアーにて搬入されている。

② 石炭ガス化炉の構造

心臓部である石炭ガス化炉は、西安熱工学院からHCERIに引き継がれた中国独自開発技術

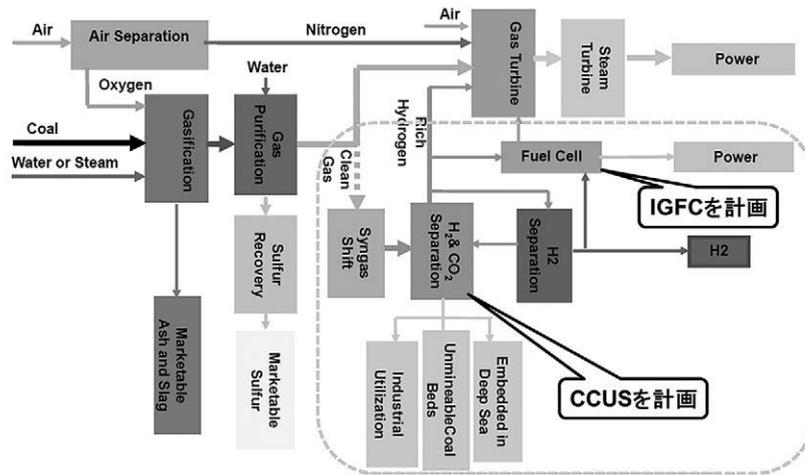


図5 GreenGenプロジェクト全体のブロックフローシート (11)

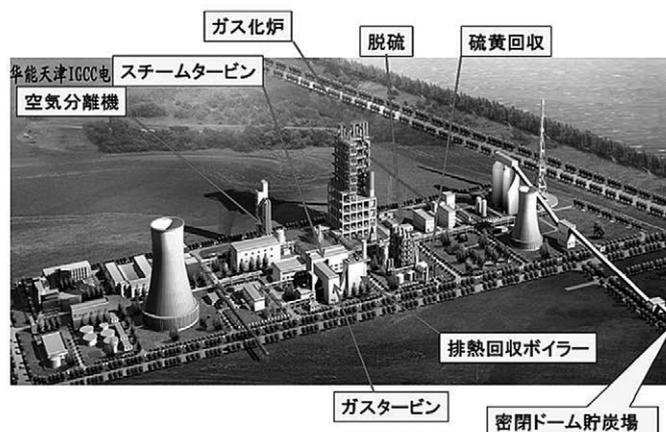


図6 プラントイメージ図 (11)

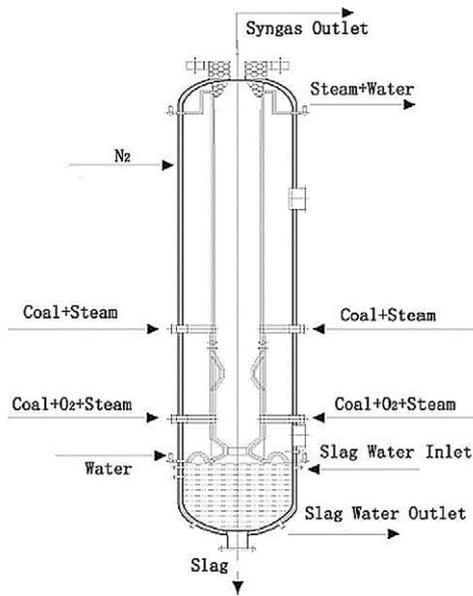


図7 石炭ガス化炉構造図 (11)

で、図7に示すように、噴流床上昇流ガス化炉で、微粉炭を乾式で二段階に供給する。各段とも対向バーナーとなっている。石炭処理量は2,000 t/dで、一段目に90から95%、二段目に5～10%の石炭を供給する。下段に原料微粉炭、スチームおよび酸素を投入して部分酸化(1300～1,600℃)し、上段には微粉炭とスチームのみ投入して熱分解(800～900℃)を主体としている。対向バーナーは2対4本で芯ズレ無く設置されているが、結果的には旋回流になっている。バーナー本数は石炭処理量により増減し3000t/dの場合は3対6本の

設計となる。炉内圧力は3～4 MPaGで、微粉炭のキャリアーガスは窒素および二酸化炭素とも可能であるが窒素を使用している。発生ガス(CO, H₂, CH₄)量は、137,500Nm³/hで、CH₄濃度は400-1000ppm、冷ガス効率は81から83%である。

HCERIでは発電用(SGC型)とは別に、化学原料用(SGQ型)の石炭ガス化炉も提供している。図8に示すように、炉本体はほぼ同じであるが、ガス化ガスの冷却に発電用では熱交換式を、化学原料用では直冷式を採用している。運転方法にも違いがあり、化学原料用では原料石炭を二段目には入れずスチームまたは水のみを投入する。その結果、化学原料用は発電用に比較して建設費が下がる。

化学原料用のガス化炉は、ほぼ同時期に内モンゴル自治区オールドス市にて年産30万トンのメタノールプラント用として稼働(石炭処理量:1000t/d)している。

(3) GreenGen プロジェクトの運転状況

2012年9月に配電許可に必要な168時間の連続運転を達成した。同12月13日以後商用運転を開始し実績を積んでいる。今までにいくつかの石炭を使用し、現在は神華炭(神府東勝炭鉱)を使っている。内部水冷管部は200℃なので灰の付着はない。溶融灰は1段下部より排出する構造で、当初詰りのトラブルが発生したが配合

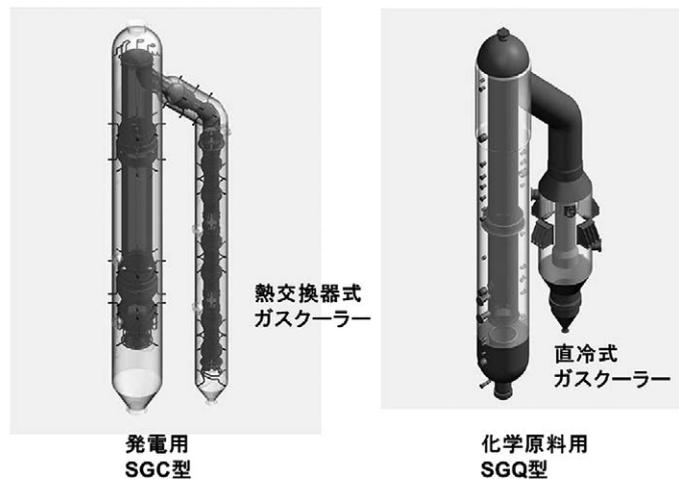


図8 発電用および化学原料用ガス化炉 (11)

および温度管理で対応できている。溶融灰の詰りは圧力差にて検知している。

緊急時の予備燃料としては重油、天然ガスが対応できる。運転当初での人員は30人が4直交替勤務し、80人が日勤の体制である。

冷ガス効率向上のために酸素量を減らした運転を試みたが、炉内温度低下による溶融灰の排出が不安定になり現状(83%)が限界と考えている。また炉内圧力を上げる方法については、ラボ実験で6 MPaGまで試みたが、炉の構造(強度)、運転方法等の解決できない問題があり現状では困難と考えている。

5. まとめ

米国ではEPAの規制案が実施されると、石炭を発電に使う場合、CCUSが必要となる。この数年で老朽石炭火力のリプレースが進む際に、天然ガス火力だけではなく石炭火力への更新も検討される。その際に、IGCCにCCUSを設置することが経済性を有するかどうかは、石炭や天然ガス、水などのインフラの入手状況、CO₂パイプラインの有無、CO₂販売価格、IGCCの建設費が主な要因になるであろう。

今回紹介したTRIG技術は、褐炭の利用を想定してSouthern Company社とKBR社が開発してきたものである。アラバマ州のSouthern Company社を訪問した際に、「実用化している噴流床ガス化炉をなぜ採用しなかったのか。」との質問に対して、「我々が適切と考える技術がなかったから開発することにした。」との回答であった。独自のアイデアに基づき新たな技術を開発するチャレンジ精神を米国DOEが支援してきたことがTRIGを産んだ。

中国においては石炭ガス化炉が古くから導入され数多く稼働しているが、IGCCについては、現在のところGreenGenプロジェクトが最初で唯一である。HCERIの今後の石炭ガス化炉の設置計画においても、ほとんどが代替天然ガス(SNG: Substitute Natural Gas)用や化学原料用である。

2012年にIGCCを建設し、それ以降、運転安定化によるコスト低減等、様々な努力をしていると思われる。第2段階のCCUS、第3段階のIGFCは工程より遅れているようである。GreenGenプロジェクトの第1段階であるIGCCの実績次第で、今後の中国での数多くあるIGCC計画の方向が決定されるので、今後数年の状況をフォローすることが重要と考えている。

IGCCを独自のガス化炉技術で新たに建設しているのは日本、米国、中国の3カ国である。その内、ガス化炉とガスタービン両方の技術を有するのは日本と米国だけである。自国の石炭火力のリプレース需要だけではなく、開発途上国向けのインフラ輸出としても重要な最先端技術であり、今後の発展を期待する。

【謝辞】

本稿は、平成25年度に新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託した事業「次世代高効率石炭ガス化技術に関する検討」において当所が行った調査の一部であり、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- (1) 常磐共同火力株式会社 Web
- (2) "Electric Power Monthly", EIA, (2014)
- (3) <http://www.indianadg.net/isnt-duke-energy-indianas-edwardsport-igcc-plant-such-a-great-deal-for-consumers-not/>
- (4) "POWER SYSTEMS DEVELOPMENT FACILITY, FINAL REPORT, REPORTING PERIOD: SEPTEMBER 14, 1990 - JANUARY 31, 2009", DOE DE-FC21-90MC25140, 2009
- (5) Southern Company, "UPDATE ON THE KEMPER COUNTY IGCC PROJECT", 2012 Gasification Technologies Conference, 2012
- (6) "KEMPER COUNTY IGCC PROJECT DRAFT ENVIRONMENTAL IMPACT STATEMENT," DOE/EIS-0409D VOLUME 1, November 2009
- (7) "Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 1 Revision2a," DOE/NETL-2010/1397, September 2013
- (8) IEEJ2008年9月号 <http://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/1746.pdf>
- (9) <http://www.xzbu.com/3/view-1392850.htm> 中国論文網
- (10) Google MapよりIAEにて作成
- (11) HCERIからの提供資料(2013/1/17)

研究所のうごき

(平成 26 年 7 月 2 日～10 月 1 日)

◇ 月例研究会

第 336 回月例研究会

日 時：7 月 25 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. バイオマス専用粉碎方式による既設微粉炭
焚きボイラでの混焼技術の実用化開発 (混焼
率増大技術の開発)
(バブコック日立(株) 呉事業所 火力技術本部
ボイラ設計部 燃焼装置設計課 副技師長
金本浩明 氏)
2. 米国と中国における IGCC の最新動向
(一財) エネルギー総合工学研究所 プロ
ジェクト試験研究部 理事 部長 小野崎正樹,
主管研究員 坪井繁樹)

第 337 回月例研究会

日 時：8 月 29 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 中長期リスク要因を考慮したエネルギーシ
ステムのあり方
(一財) エネルギー総合工学研究所 プロ
ジェクト試験研究部 主管研究員 都筑和泰)
2. 微細藻類バイオ燃料について
(一財) エネルギー総合工学研究所 プロ
ジェクト試験研究部 主管研究員 松井 徹)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：内藤正則, 高橋淳郎, ペレグリニ・マルコ

テーマ：Analysis of Accident Progression of Fuku-
shima Daiichi NPP by the SAMPSON
Code

-Unit-1：内藤正則

-Unit-2：高橋淳郎

-Unit-3：ペレグリニ・マルコ

発表先：米国機械学会 (ASME) 主催

22nd International Conference on Nu-
clear Engineering (ICONE-22) (横浜市)

日 時：7 月 8 日, 10 日

発表者：相澤芳弘

テーマ：World Hydrogen Energy Conference
(WHEC) 全体総括

発表先：(一社) 水素エネルギー協会 第 145 回
定例研究会 (WHEC2014 報告会)

発表時期：7 月 16 日

発表者：石本 祐樹

テーマ：WHEC2014 報告会「将来展望」

発表先：(一社) 水素エネルギー協会 第 145 回
定例研究会 (WHEC2014 報告会)

日 時：7 月 16 日

発表者：尹聖昊, 加藤攻, 宮脇仁, 荒牧寿弘,
持田勲, 杉本義一, 貴傳名甲, 小野崎正樹,
上田成, 岡田清史

テーマ：木質系バイオマスからの高機能炭素材

発表先：第 23 回日本エネルギー学会大会
(九州大学)

日 時：7 月 19 日

発表者：笹倉正晴, 石本祐樹, 坂田興

テーマ：Concept and Action Plan Studies in Japan
for Realizing CO2-free Hydrogen Global
Chains

発表先：Grand RE 2014 (Grand Renewable En-
ergy 2014 International Conference)
(東京)

発表日：7 月 27 日～8 月 1 日

発表者：森山亮

テーマ：Exploring the engineering parameter
space of stratospheric aerosol injection

発表先：CLIMATE ENGINEERING CONFER-
ENCE 2014

日 時：8 月 19 日

発表者：黒沢厚志

テーマ：石炭火力発電所における水銀の大気排出
規制の動向

発表先：セミナー 水銀条約 - 排出規制動向か
ら水銀の除去処理・排水処理・リサイク
ル技術まで (主催：技術情報センター)

日 時：8 月 26 日

発表者：内藤正則

テーマ：Analysis of Accident Progression with the SAMPSON Code in the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Considering Debris Flow Paths from the Core

発表先：カナダ原子力学会（CNS）主催 19th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC-2014)

日時：8月27日

発表者：内藤正則, 高橋淳郎, ペレグリニ・マルコ

テーマ：

(1) Methods for Investigation of Severe Accidents as Support to the Fukushima Daiichi NPP decommissioning (発表者：ペレグリニ・マルコ)

(2) In-Vessel Accident Analysis of Fukushima Daiichi NPP Unit-1 with SAMPSON Code (発表者：内藤正則)

(3) 2 Accident Analysis of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit by the SAMPSON Code (発表者：高橋淳郎)

(4) Analysis of Fukushima Daiichi unit 3 core melting progression by the SAMPSON code (発表者：ペレグリニ・マルコ)

発表先：International Workshop on Nuclear Safety and Severe Accident (NUSSA-2014) (東京大学 柏キャンパス)

日時：9月3日

発表者：鈴木洋明, 溝内秀男, 高橋淳郎, ペレグリニ・マルコ, 森田能弘

テーマ：東京電力福島第一原子力発電所炉内状況把握の解析・評価

(第27報) SAMPSONコードによる事故進展解析のモデルと境界条件 (発表者：鈴木洋明)

(第28報) SAMPSONコードによる福島第一原子力発電所1号機の事故進展解析 (発表者：溝内秀男)

(第29報) SAMPSONコードによる福島第一原子力発電所2号機の事故進展解析 (発表者：高橋淳郎)

(第30報) SAMPSONコードによる福島第一原子力発電所3号機の事故進展解析 (発表者：ペレグリニ・マルコ)

(第32報) SAMPSON/MCRAによる下部プレナ

ムへのデブリ流出解析 (発表者：森田能弘)

発表先：日本原子力学会 2014秋の大会 (京都大学)

日時：9月10日

発表者：鈴木洋明, 溝内秀男

テーマ：Accident Analysis of TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants with the SAMPSON Severe Accident Code

(1) MIImprovement of Debris Relocation Model (発表者：鈴木洋明)

(2) Unit 1 Analysis with Improved Debris Relocation Model (発表者：溝内秀男)

発表先：2014 Water Reactor Fuel Performance Meeting (WRFPM2014) (仙台国際センター)

日時：9月16日

発表者：鈴木洋明

テーマ：SAMPSONコードによる東京電力福島第一原子力発電所事故解析

発表先：応用物理学学会シンポジウム (北海道大学)

日時：9月19日

発表者：小野崎正樹

テーマ：非在来型エネルギーによって何がかわるかー至近のシエールガスなどエネルギー動向の変化と将来ー

発表先：日本鉄鋼協会, 高温プロセス部会シンポジウム 「エネルギー革命の鉄鋼へのインパクトと今後の製鉄プロセス」

日時：9月24日

[論文発表]

発表者：益田泰輔

テーマ：Impact of Forecast Error of Photovoltaic Power Output on Demand and Supply Operation in Power Systems

発表先：発電システム計算会議 (PSCC) 2014

日時：8月21日

発表者：益田泰輔

テーマ：太陽光発電予測誤差を考慮した確定的起動停止計画手法の基礎検討

発表先：電気学会・電力エネルギー部門大会 (京都)

日時：9月12日

発表者：益田泰輔

テーマ：太陽光発電予測を利用した電力系統運用
における運転予備力の評価

発表先：電気学会・電力技術電力系統技術合同研
究会（大阪）

日 時：9月24日

[寄稿]

発表者：黒沢厚志

テーマ：東京スカイツリー地区熱供給：日本一高
い塔の地下で

寄稿先：エネルギー・資源学会誌 Vol.35 No. 4
(2014年7月号)

発表者：松井一秋、楠野貞夫、笠井滋、藤井貞夫、
林道寛

テーマ：「平成25年における重要なエネルギー関
係事項」(Annual Energy Reviews-2013)
II章4 原子力

寄稿先：日本エネルギー学会誌9月号

◇ 人事異動

○7月15日付

(退職)

鶴沢 憲 原子力工学センター主任研究員

○7月31日付

(出向解除)

岡村秀彦 業務部長兼エネルギー国際標準(ISO)
センター

○8月1日付

(嘱託採用)

岡村秀彦 業務部長(参事)兼エネルギー国際
標準(ISO)センター

○10月1日付

(採用)

加藤悦史 プロジェクト試験研究部主任研究員

(出向採用)

谷内田淳一 プロジェクト試験研究部主管研究員

編集後記

私事ではあるが、筆者の唯一の海外赴任先は、東アフリカの赤道直下の国、タンザニアである。かれこれ20年前の話であるが、最も心配されたのは家族の健康の確保と病気の予防であり、黄熱病や肝炎、破傷風など数種類の予防接種を行い渡航に臨んだ。

しかし、感染機会の多いマラリアについては、昨年英国の製薬企業からワクチンの実用化に目途がついたとの発表があったが、当時はもちろんそのようなものではなく、予防薬も副作用の懸念から早々と止めた。そんな中で効果を発揮したのが、古典的ながら蚊取り線香と蚊帳である。マラリア原虫を媒介するハマダラ蚊の主な活動時間帯が夜間ということもあり、蚊帳を吊り、その横で夜通し蚊取り線香を焚いたものだ。今でもあの家は線香の匂いが漂っているのだろうか。

それはさておき、このところデング熱の話題が新聞紙面等を賑わせている。代々木公園周辺からはじまり、今や全国に感染が拡大しているこの熱帯病の感染源や

感染拡大のルートなどは今後解明されることになろうが、近年の地球規模での気候変動とは無関係ではないのではないだろうか。地球温暖化が進行しつつある現実を踏まえると、日本の亜熱帯化や、これによる病原媒介物の生息分布の変化、ひいては日本がこれまで経験したことのない感染症の発生可能性も念頭に置いて、国や医療従事者、製薬企業などの関係者それぞれの役割において対策を講じていくことが求められると考える。

いずれにせよ、新興国を中心に世界の二酸化炭素排出量が急増する中、地球温暖化問題の解決に向け、国際社会が一丸となって温室効果ガスの大幅な排出削減に努めることが強く要請されている。

わが国としても、環境への適合を含む3E+Sの基本的視点に立ち、いかなるエネルギー供給構造を目指すのか、冷静かつバランスのとれた議論がなされることを期待したい。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第37巻第3号

平成26年10月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

<http://www.iae.or.jp/>

(印刷) 株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。

