

エネルギー問題の 解決に貢献する 高温材料



地球環境保護のため、CO₂を排出しない再生可能エネルギーの必要性が叫ばれているが、現状では化石エネルギーを燃料とする火力発電は重要な役割を担っていることに変わりはない。高効率化を図るためには、火力発電の燃焼温度の高温化が不可欠であり、使用される材料の環境はますます過酷になっている。世界でもさまざまな高温材料の研究が進むなかで、今までにない高温強度を持つ耐熱鋼に期待が高まっている。

電力安定供給を支える火力発電

2018年7月、経済産業省より第5次エネルギー基本計画が発表された。エネルギー基本計画は、エネルギー政策の基本的な方向性を示すために政府が策定するものであり、第5次計画は、エネルギーを巡る国内外の情勢変化を踏まえ、2030年、さらに2050年を見据えた計画とされた。3E（エネルギーの安定供給、経済効率性の向上、環境への適合）+S（安全性）の原則を発展させ、さらに、①安全の革新を図ること、②資源自給率に加え、技術自給率とエネルギー選択の多様性を確保すること、③「脱炭素化」への挑戦、④コストの抑制に加えて日本の産業競争力の強化につなげること、などが挙げられている。

これらを目指し、多様な電源を活用してエネルギー供給を維持することとなっているが、2030年度のエネルギーのあり方を示した「長期エネルギー需給見通し」によれば石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料の電源構成比率は合計で56%となっている（図1）。日本では、安定して電気を供給できる化石エネルギーが今後も不可欠である。

世界のエネルギー需給の点でも火力発電は重要であり、世界の全電力の68%を占める火力発電量は2040年には1.4倍以上になると予想されている。火力発電の発電効率は大きく

向上してきたにもかかわらず、他の発電技術に比べCO₂排出量が多い、という問題がある。そこで、求められるのが、火力発電のCO₂削減への取り組みである。

火力発電の効率向上を可能にする高温材料

火力発電は、燃料を燃やしてつくった水蒸気で蒸気タービンを回し電気を作るが、もし効率をアップできれば、燃料使用量を削減でき、ひいてはCO₂排出量の削減につながる。そこで、高効率化に向けたさまざまな技術開発が行われており（図2）、以下のような方式が導入されている。

●超々臨界圧発電（USC）

燃料を燃やして蒸気をつくる際に、極限まで高温、高圧にして蒸気タービンを回すシステム

●コンバインド・サイクル発電

高温のガスを燃やしてまずガスタービンを回し、その排ガスの熱を再利用して蒸気をつくることで蒸気タービンも回すシステム

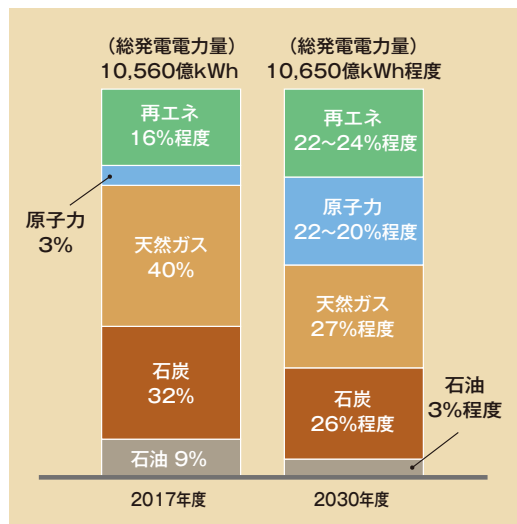
●石炭ガス化複合発電（IGCC）

コンバインド・サイクル発電でガスタービンを回すのに使われる「高温ガス」を、石炭をガス化して作るシステム

ガスタービンを初めとする熱機関は、高温で運転することに

●長期エネルギー需給見通し(電源構成) (図1)

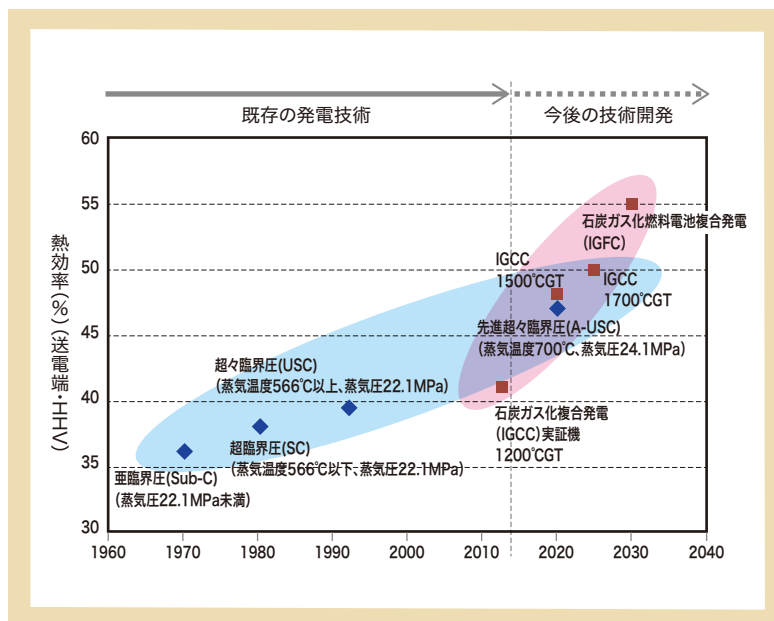
現在のエネルギーの基本方針に基づいて施策を講じた場合の電源構成の比較。資源エネルギー庁想定2030年度のエネルギーミックスを見ると、再生可能エネルギーの比率は高まるが、化石燃料の比率も大きいことがわかる。



(資源エネルギー庁資料より)

●石炭火力発電の効率向上(図2)

現在、先進超々臨界圧発電(A-USC)が最高効率の技術として期待されている。



(出典: 総合資源エネルギー調査会資料2015年3月を元に作成)

よって発電効率が上がり、CO₂排出量の低減に極めて有効な手段になる。その操業温度の限界を決めている最大の要因が、高温材料の使用できる上限温度である。そこで、高温高効率操業の要求に応える新たな高温材料の開発は極めて重要である。

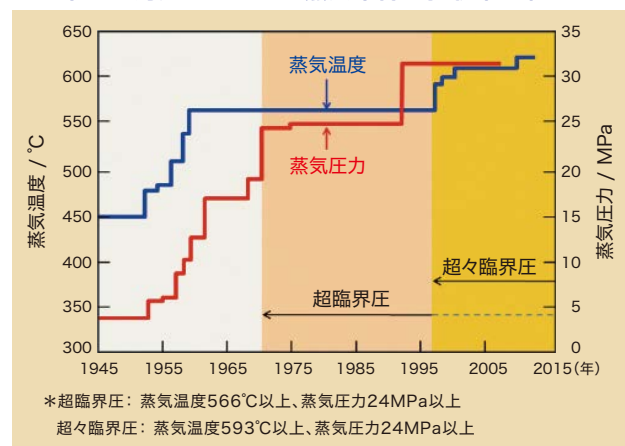
次世代の火力発電で注目される「鉄」

日本における火力発電の蒸気温度の変遷を振り返ると、1990年代に蒸気温度593℃に達し、2009年には620℃まで到達した(図3)。この温度は世界最高の蒸気温度であり、主蒸気管には高クロムフェライト鋼が使用されている。

高クロムフェライト鋼は、クロムを9~12%程度含むフェライト系耐熱鋼である。高温クリープ強度および耐酸化性に優れ、火力発電プラントの主蒸気管や高温再熱蒸気管と呼ばれる大径厚肉の鋼管に使用されている。現在、さらに高温の700℃級の先進超々臨界圧発電(A-USC)プラントの開発が進められている。

これまで700℃を超える高温領域に使われる材料としては、主にニッケル基合金が検討されていた。しかし、ニッケル基合金は資源調達や価格の面で問題があり、使用できる箇所に限りがある。その点、鉄鋼材料は資源が豊富で価格の点でも有利で使いやすい。豊富な研究の蓄積を生かし、高温材料としての鉄にはさらに伸びしろがあるのではないだろうか。このような考えから、鉄の利点を生かして、新しい可能性を拓く材料研

●日本の火力発電における蒸気条件の推移(図3)



(資料提供: 電力中央研究所)

究が進められている。

2012年から科学技術振興機構の先端的低炭素化技術開発(ALCA)において、各種の高温材料の開発が行われてきたが、このプロジェクトにおいて、耐熱鋼の性能限界を大きく改善し、新たな耐熱鋼の指導原理を構築するなどの成果が上がっている。

また日本鉄鋼協会では、「高温材料の高強度化」研究会(2018.3~2021.2)の活動が行われ、高温材料設計理論の構築を目指している。

はたして鉄は、高温下でどこまで使えるか。耐熱鋼の新たな可能性を信じ、研究者の挑戦が続いている。

●文 杉山香里

INTERVIEW

新たな元素「窒素」に着目し シンプルで強い耐熱鋼の実現を目指す

火力発電プラントの高効率化を図るためには、材料の最高使用温度をどこまで高められるかが大きな鍵となる。現在の蒸気温度は620℃。これを超える高温材料を実現するため、九州大学大学院の中島教授が着目したのは、これまで使われていなかった「窒素」だ。安価で無尽蔵な窒素を使って、耐熱鋼のブレークスルーを目指した研究の経緯と、今後の展望についてうかがった。(研究内容の詳細は連携記事p498参照)

Q1

耐熱鋼の研究を始めたきっかけは何ですか。

大学時代の研究テーマは鉄ではなく、純アルミニウムの高温変形機構でした。その後もいろいろな材料の変形機構を見ましたが、30代になって、私の論文を目にした鉄鋼メーカーの方が共同研究をしたいといってくれました。ここから鉄鋼研究者同士の交流が始まり、鉄鋼協会の「耐熱鋼・耐熱合金の高強度化」研究会に参加して、タングステン強化フェライト鋼を研究す

ることになりました。当時は「日本で高効率な火力発電所を造ろう」という機運が高まり、フェライト鋼は期待の材料でしたね。

Q2

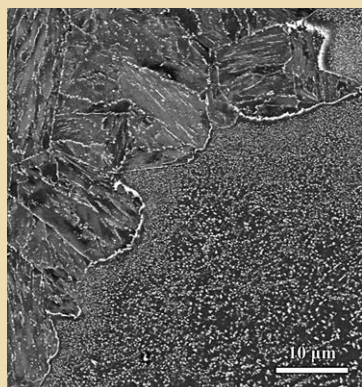
どうして窒素を活用しようと考えたのですか。

火力発電プラントの蒸気温度は時代とともに高くなってきましたが、蒸気温度はなだらかに上がるのではなく、ある点で階段状に上がり、その後は横ばいになることの繰り返しです。しかし横ばいの間も材料の研究は進んでいて、ある時突然ブレークスルーが起こる。そろそろ次の階段が上がってもよい時期ですね。そのブレークスルーを目指したのが我々の研究です。

以前、高速増殖炉「もんじゅ」の燃料被覆管の高温強度を調べたことがあり、被覆管をフェライト鋼で作れないかと考えていました。この時の材料設計のコンセプトは「酸化物をうまく使う」こと。そしてできたのが酸素を添加したODS(酸化物分散強化型)フェライト鋼で、すぐれた高温強度が得られました。しかしODS鋼はパウダーメタラジーで作るため、大型部品を作るのは難しい。高クロムフェライト鋼でも、ODS鋼と同レベルの強



九州大学
大学院総合理工学研究院
教授 中島 英治 氏



フェライト+マルテン
サイト複合組織鋼の微
細組織
フェライト部(右下部)
では析出物が緻密に
分散している。複合組
織とすることにより大
幅に強度を向上するこ
とができた。

度を得ることはできないだろうか。そこでたどりついたのが「酸素ではなく、窒素ならどうか」という考えでした。

周期律表を見ると、炭素と酸素があって、その間に窒素がある。これを使わない手はないでしょう。窒素の活用した耐熱鋼の例はほとんどなかったと思います。

ODS鋼と、現在火力発電プラントで使用されている高クロムフェライト鋼の強度を比べると、ODS鋼はおよそ1000倍以上強い。新しい高クロムフェライト鋼の目標は、ODS鋼のクリープ強度を目指して、700℃、100MPaでの強度が10万時間を超えることとしました。

Q3

目標を達成するために どのような苦労がありましたか。

当初イメージしていたのは、ODS鋼の酸化物と同じように、窒化物が微細に分散した材料でした。しかし、通常のプロセスでは窒素を多く固溶させることが難しく、窒素を加圧して半強制的に固溶させてみたらゴロゴロした窒化物が析出してしまった。始めてから2年ぐらい七転八倒したものの、まったく強度が出ませんでした。

耐熱材料では耐酸化性も非常に重要ですが、耐酸化性と高温強度は基本的には相容れない性質です。ここで大切になるのがクロムの拡散の最適制御です。耐酸化性を高めるには、材料表面のクロムの拡散を促進する方がよい。一方、高温強度を高めるには拡散を抑える方がよい。窒素は強度も耐酸化性も両立できる、うまい材料です。この他にも、さまざまな要求特性をバランスよく満足させる方法を検討しました。新たな強化因子としてタングステンを添加しました。そして、耐酸化性は9%クロムと窒素で、強度は窒素とタングステンで、要求特性を満足させようとした。

その結果、現在の高クロムフェライト鋼の上をいく、650℃で

使用できる材料が得られました。残念ながら目標の700℃には至らなかった。しかし650℃でも現在のプラント内の配管では十分に使える温度であり、耐熱鋼の適用の幅が広がると思います。

Q4

耐熱鋼の窒素利用は 今後どのような方向に進むのでしょうか。

新しい耐熱鋼の研究は一段落しましたが、正直なところまだ不満が残っています。研究の当初は、窒素だけを使ってシンプルな組織を作ろうとしましたが、目標の強度を達成するために妥協をした点がありましたから。

実用材料の組織は、いろいろな結晶粒がまじっています。我々が目指すのは、シンプルな強化メカニズムからできるシンプルな組織です。単結晶で細かい粒子が分散したような材料なら理想的ですね。たとえば、広い夜空に星が無数に散らばっているような。そんな組織にできれば、絶対にもっと強度が出るはず。それを目指しているのです。

Q5

今後の耐熱鋼の研究において 人材育成は重要なテーマですね。

昔、本多光太郎先生は「産業は学問の道場なり」と言われました。産業界で起こっている問題をきちんと解決できるのが本当の学問である、ということです。大学は産業界の要望に応え、解決策を提案すべきです。しかし最近、日本の耐熱鋼の研究者は、大学でも鉄鋼会社でも数が減っており、我々は質の高い研究者を育てる努力をしなければなりません。耐熱鋼は学問的に大変興味深い分野なので、鉄鋼協会の「高温材料の高強度化」研究会には、企業の若手研究者の方にも参加してもらうように勧めています。

我々の研究室では、学生は体を動かすのが半分、机で勉強するのが半分というスタイルでやっています。さまざまな金属の試料作り、材料試験も自らやります。例えば、アルミニウムとニッケル基合金を自分で研磨してみると、硬さや粘さの違いがわかる。そういう感覚が大切だと思います。

これからは、データサイエンスと材料工学をいかに融合させていくかが大事になります。海外ではデータを重視する技術者が増えています。しかし、材料に触った感覚がわかるような人材はぜひとも必要です。これまで日本はノーベル賞をたくさん受賞し、世界の中で高い技術力を維持してきた。そのベースには、現場できちんとした材料を作ってきた蓄積がありました。大学も企業もそういうことに時間や労力を惜しまず、今後も人材育成に取り組むことが大切だと思います。

INTERVIEW

耐熱鋼の新たな指導原理を構築 粒界析出制御で広がる鉄の可能性

次世代の800℃級火力発電プラントでは、これまでニッケル基合金しか適用できないと言われていた。ここに適用されることを目指し、耐熱鋼の新たな材料設計の研究が進められている。東京工業大学の竹山教授は、粒界析出強化を利用した新たな指導原理の構築に取り組んだ。世界でも例を見ない新たなアプローチはどのような発想から生まれたのか、竹山教授にお話をうかがった。(研究内容の詳細は連携記事p505参照)

Q1

高温材料研究のどんなところに興味を持たれたのですか。

例えば自動車用鋼板では、作り込んだ組織によって強度が決まります。一方、高温材料は温度とともに原子が拡散し、組織が時々刻々と変化する。この時間軸をどう考えるかがおもしろいところです。難しいけれど知恵を絞らなければいけない。

パーフェクトな人間がいないように、金属にも必ず欠陥がある。それが材料の特性や変形に深く関わることに興味をひかれました。

1970年代には電子顕微鏡を使って、転位が観察できるようになりました。高温下での転位の様子や析出物の変化、それらのメカニズムの解明などの研究が大きく進み、現在の高温材料研究につながる基礎となったと思います。

Q2

鉄鋼材料に注目したのはどうしてですか。

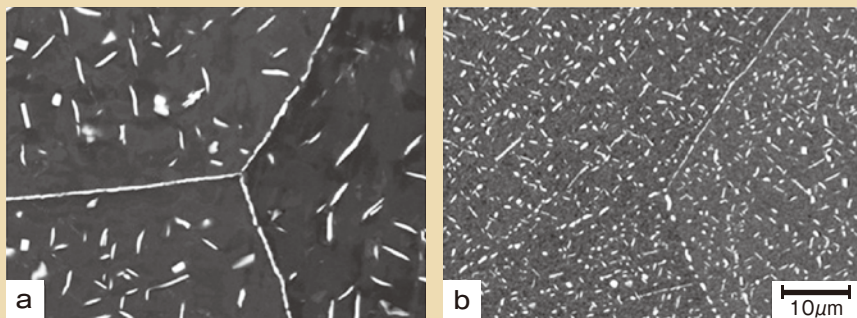
つねづね私は、ジェットエンジンのような高温部品はなぜニッケル基合金なのか、と考えていました。鉄にニッケルを入れれば同じfcc構造になるのに、なぜ安価で使いやすい鉄が使われないのか、と不思議に思ったのです。

fcc構造を持つ鉄といえばオーステナイト鋼。現在の火力発電プラントの耐熱温度620℃はフェライト鋼の限界に近く、700℃とか800℃を目指すならオーステナイト鋼でなくてはなりません。オーステナイト鋼は基本的に炭化物で強化しますが、ニッケル基合金は金属間化合物で強化します。それなら「オーステナイト鋼を金属間化合物で強化すれば強度が上がるのではないか」と考え、いろいろな人に聞いたがわからなかった。それは、金属間化合物は硬くて脆くて役に立たない、というのが通説だったからです。

本当にそうだろうか。そう思って、Fe-Ni-M 三元系の組成領域を見ていくと、あるところがポツカリと抜けていることに気付いた。そこには、ラーベス相がありました。ラーベス相は複雑な結晶構造で、有害相だと思われていたため、多くの人がそこを避けて材料設計をしていたのです。そこで私は、ラーベス相を生かすことに取り組みました。

思い込みはよくありません。学生たちには日頃から「教科書に書いてあるからと言ってそれがすべて正しいと信じてはいけない」と言っています。できた材料は、ニッケル基に匹敵する

クリープ強度があることがわかりました。800℃の応力／破断時間曲線のグラフにあるように、鉄基ながらニッケル基のエリアに入っています。これをもたらしたのが「粒界析出強化」なのです。



Fe-20Cr-30Ni-2Nb鋼の800℃/1200 h時効材の組織

(a) 0.03 at%Bを含む鋼、 $\bar{p}=89\%$ 、(b) B無添加鋼、 $\bar{p}=52\%$ ($\bar{p}$:析出物による粒界被覆率)



東京工業大学
物質理工学院 材料系
教授 竹山 雅夫氏

Q3

「粒界析出を生かす」という発想はいつごろ生まれたのですか。

私が粒界析出強化に気づいたのは学生時代のことです。何年間も温めていたアイデアでした。学位論文で、析出物による粒界の被覆率とクリープ強度の関係を調べた時、粒界の被覆率が高いほどクリープ強度がぐんと高くなることに気づきました。結晶粒界は高温下では弱因子として働く。この結晶粒界を、熱力学的に安定な相で覆うことにより、高温強度が高まるのです。

このような考えから開発を進めているオーステナイト鋼(Fe-20Cr-30Ni-2Nb鋼)の組織では、結晶粒内の析出密度は粗いが、粒界の被覆率は89%、一方比較材は52%です。写真で白く見えるところがラーベス相で、粒界を覆っており、長時間経っても安定して存在しています。

よく、高温材料が破断した時に、破面にあるラーベス相などを見て「これが悪さをしている」と考えがちです。しかしラーベス相は平衡相であり、時間がたっても安定している。それを強化相に使えばよいと気づいたということです。

Q4

耐熱鋼の研究は産業界からも注目されていますね。

日本は火力発電で世界最高の技術を持っており、さらに上の温度を目指しています。ALCA(p493参照)プロジェクトが始まる前に、耐熱鋼の研究について意見を求められました。耐熱

鋼は10年以上もたせようという材料であり、10年ぐらいかけてやるような息の長い研究が必要ではないか、とお答えしました。オーステナイト鋼でどこまで高温化が可能か、というテーマは、サイエンスとしても、工学としても重要なテーマだと思います。まさに鉄の可能性を追求するような研究ですね。

今回の研究成果は、世界に向けて日本発の画期的なものです。すぐに実用化とはいかないかもしれませんが、それまで研究を継続していくことが大事です。欧米のまねをするのではなく、日本は、突き抜ける勇気を持って、研究を継続したいものです。

Q5

今後の耐熱鋼への期待をお聞かせください。

ニッケルは、戦略元素であり高価なので、あまり使いたくない。新しい耐熱鋼はニッケル基合金の代替となる可能性があります。ニッケル基合金で多く使われているインコネル718の最高使用温度はせいぜい650℃で、ジェットエンジンのタービンディスクに使われています。世界中の民間航空機は約2万機。エンジンに新しい耐熱鋼が使われれば莫大な量になります。自動車エンジンだって、NOx低減のため高温燃焼するには、エンジン回りに新しい耐熱鋼が期待されています。

私は「鉄は神様からの贈り物」だと思います。宇宙の誕生とともにあった核融合の終焉の姿であり、地球は鉄の星。鉄をいかに使いこなすかが、我々人間の知恵の絞りどころです。耐熱鋼は非常に可能性を秘めた研究分野です。多くの若い人たちに入ってもらい、知恵やアイデアを研究に取り入れていきたい。そして、鉄の可能性をもっと広げてほしいと思います。