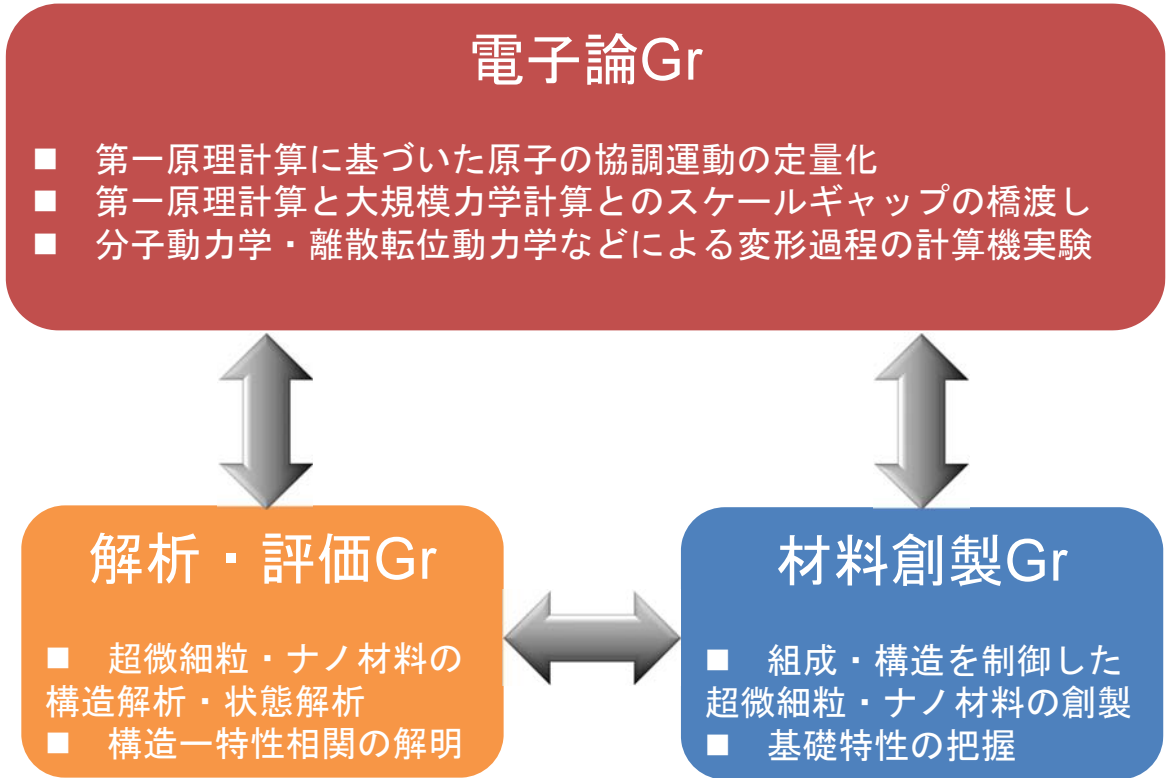
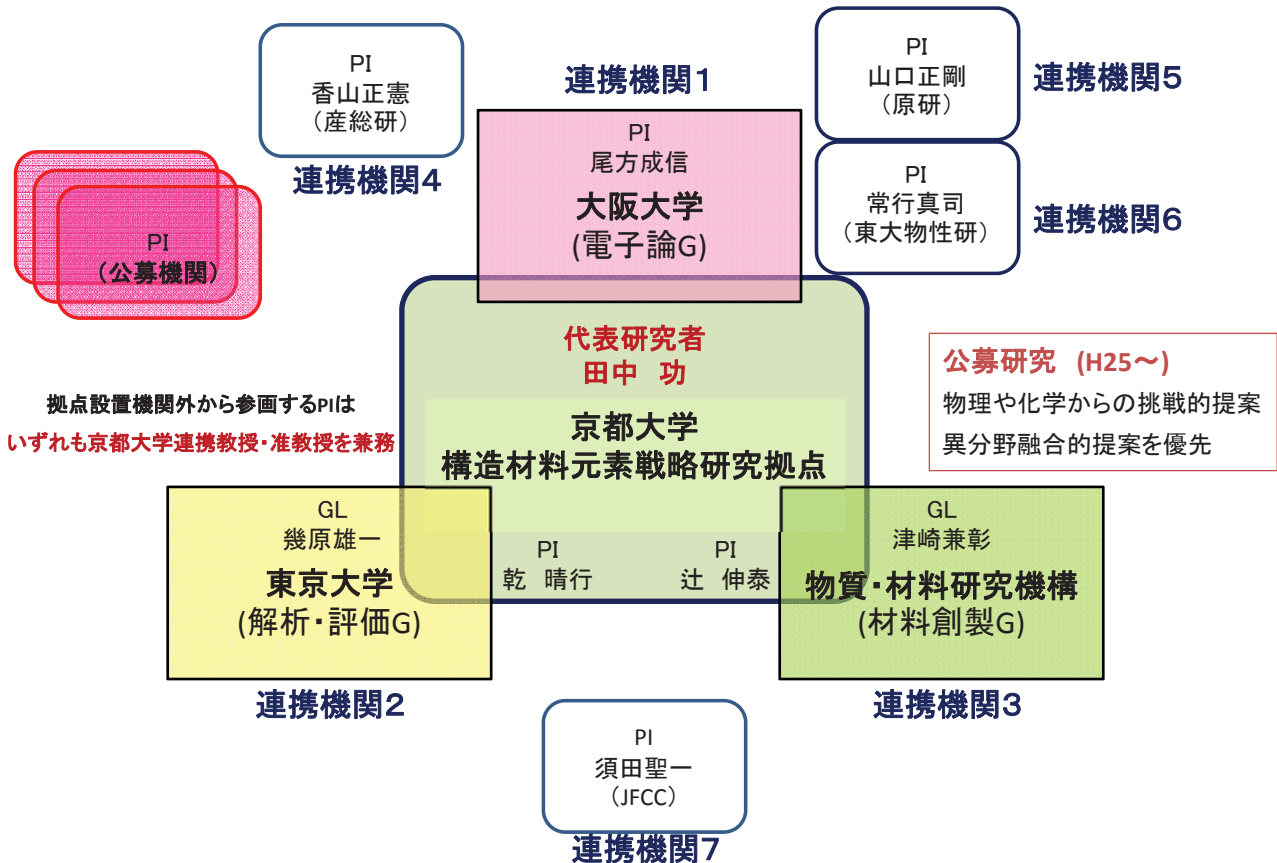


研究の戦略



拠点の構成



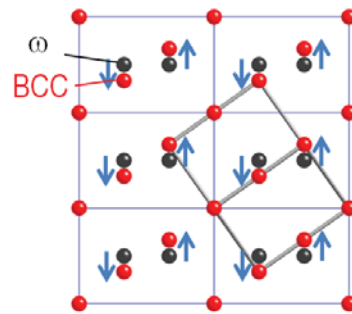
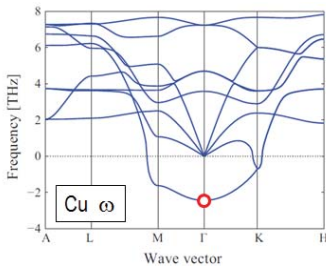
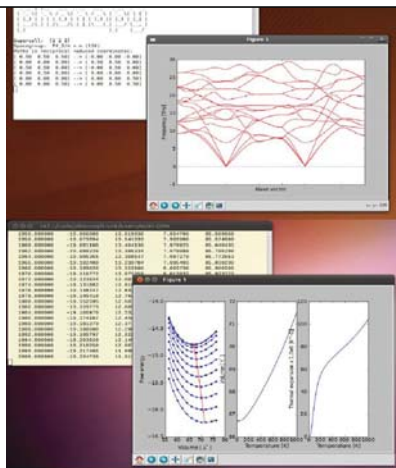
電子論グループ GL 田中 功(京大)

計算材料科学分野で

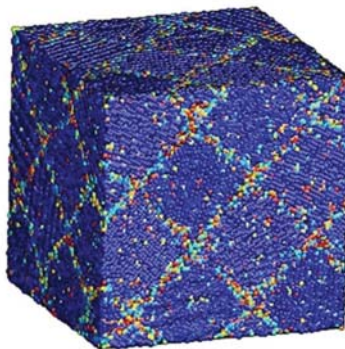
世界を先導する顕著な業績と
分野振興・分野交流に貢献

田中: 京都大学福井謙一記念研究センター長
(2010-2012)

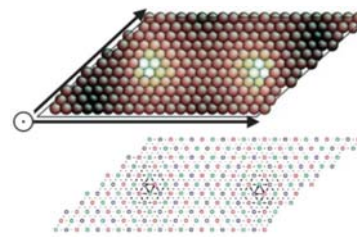
第一原理フォノン計算の世界標準
phonopyコード(オープンソース)
2011年だけで59か国から4000ダウンロード
田中グループ



Cu中の ω 構造からBCC構造への
相転移経路: 第一原理フォノン計算
田中ら (2012)



Cuナノ結晶の高温変形挙動
: 分子動力学計算 尾方ら (2011)



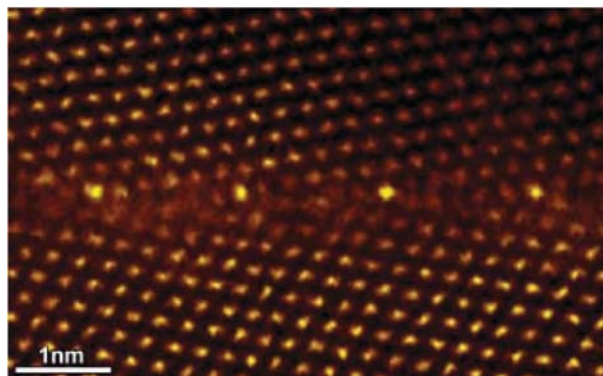
Mo中のらせん転位芯の安定構造と
移動の素過程: 第一原理計算
尾方ら (2007)

解析・評価グループ GL 幾原雄一(東大)

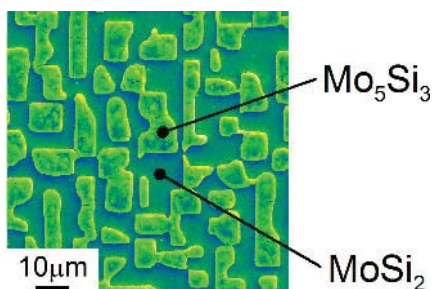
電子顕微鏡を利用したナノ解析・評価分野で
世界を先導する顕著な業績と
分野振興・分野交流に貢献

幾原: 科研費 特定領域研究
「ナノ機能元素」領域代表 2007-2011

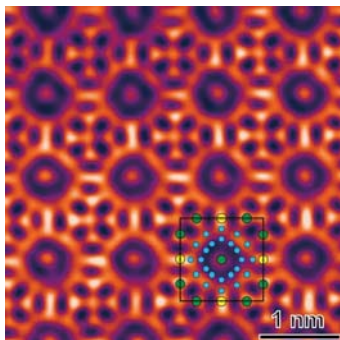
乾: JST 先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA)
「界面機能化に基づくMoSi₂基Brittle/Brittle 複相単結晶
超耐熱材料の開発」研究代表 2011-2020



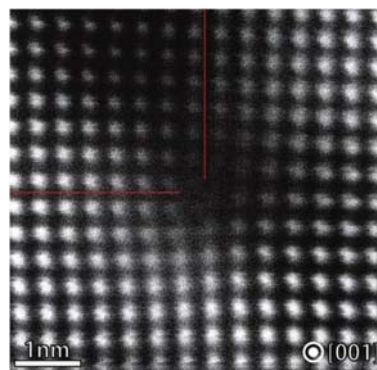
Al₂O₃セラミックス中の Σ 31結晶粒界の
原子構造と粒界偏析した γ 原子直視(幾原ら Science 2006)



Brittle/Brittle共晶合金の微細構造
(乾ら)



クラスレート化合物の
走査透過電子顕微鏡像
(乾ら)



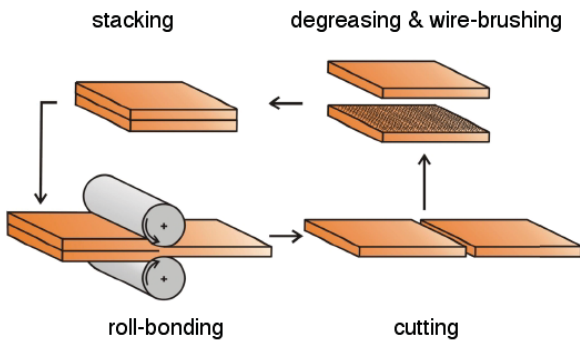
$a/2\langle 110 \rangle = a/2[100] + a/2[010]$
NiO薄膜中の刃状転位対(幾原ら)

金属材料の組織制御に関する研究分野で

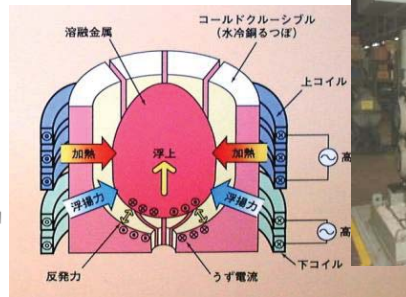
世界を先導する顕著な業績と
分野振興・分野交流に貢献

津崎: NIMS 元素戦略材料センター長

辻: 科研費 新学術領域研究
「バルクナノメタル」領域代表 2010-2014
第5回日本学術振興会賞 2009



バルクナノメタルを創るARBプロセス
世界25ヶ国で使用,
(辻ら, 引用1000回以上)



NIMSの材料創製装置インフラ群(津崎グループ)
(20kg高周波真空溶解, 300トン鍛造機,
超清浄浮揚溶解炉, 150トン溝ロール圧延機)

他部局・他機関・大型施設・他拠点等との積極的な連携

京都大学
福井謙一記念研究センター



計算物質科学イニシアティブ
教育連携拠点



SPring8
KEK-PF

元素戦略
拠点

磁石

触媒・電池

電子材料

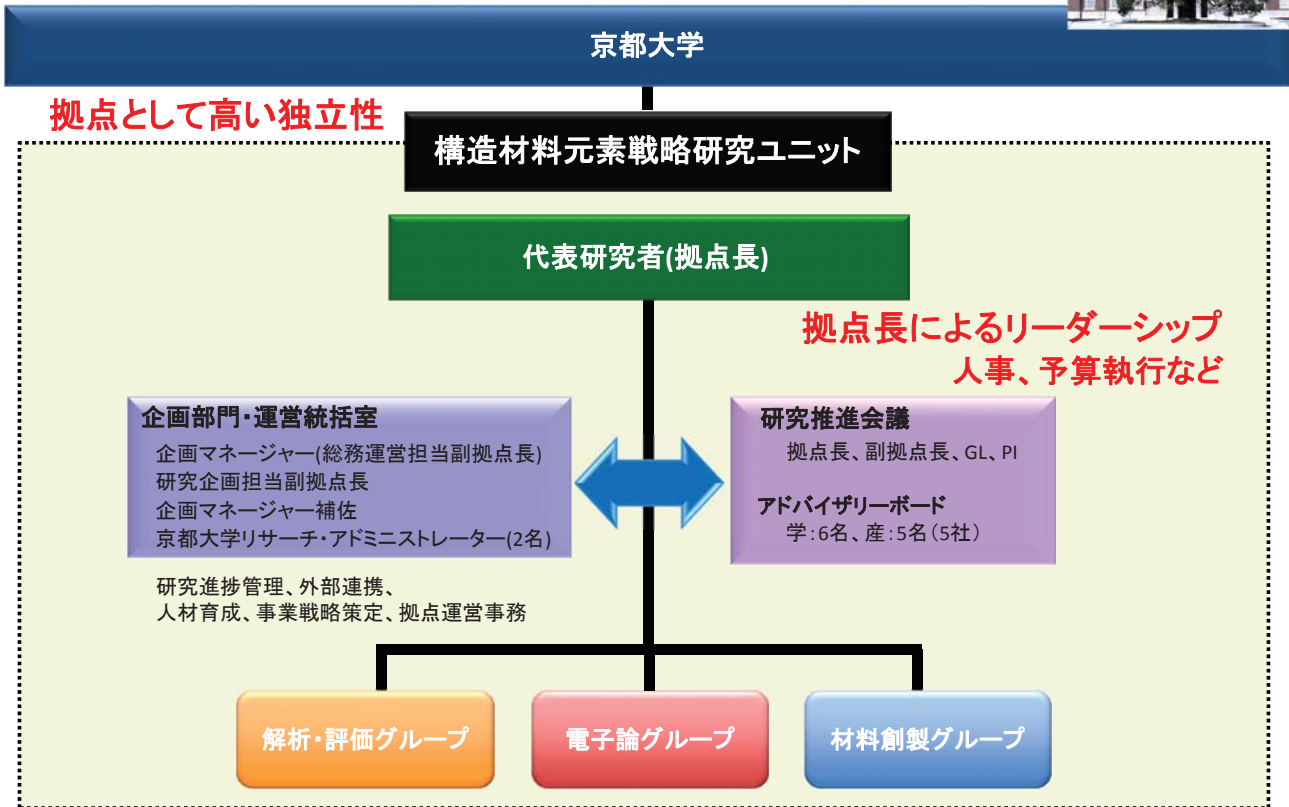
京都大学
構造材料元素戦略研究拠点

密接連携

中性子その場力学解析
@茨城・J-PARC

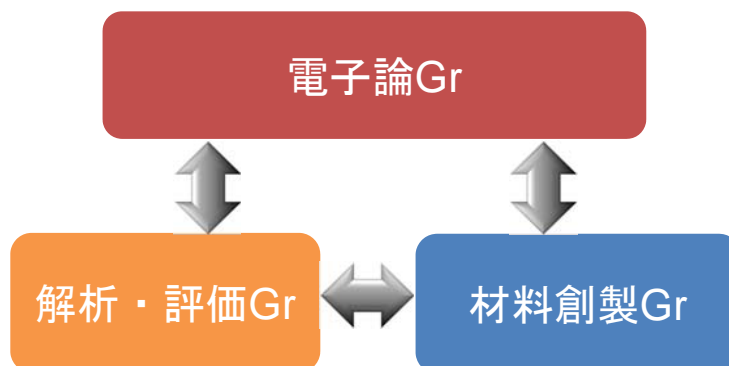


拠点の体制



研究実施体制 (当初3年間)

当初3年間(H24~26)は、電子論グループを中心として活動
実験研究の狙いを定める。



研究実施体制(4年目以降)

4年目以降(H27~33)は、電子論研究の成果を
実際の構造材料創製に確実に繋げる。

新しい材料科学のパラダイム創出

科学的知見の深化

若手人材の輩出

世界を先導する構造材料元素戦略研究拠点

電子論Gr

解析・評価Gr

材料創製Gr

究極の構造材料創製

高い国際競争力を持つ
実用構造材料の開発

異分野連携・学問分野深化

学界アドバイザーとの連携

幅広い分野の学協会と連携

文科省 新学術領域

JST CREST「元素戦略」

計算物質科学イニシアティブ

実用化研究

産業界アドバイザーとの連携

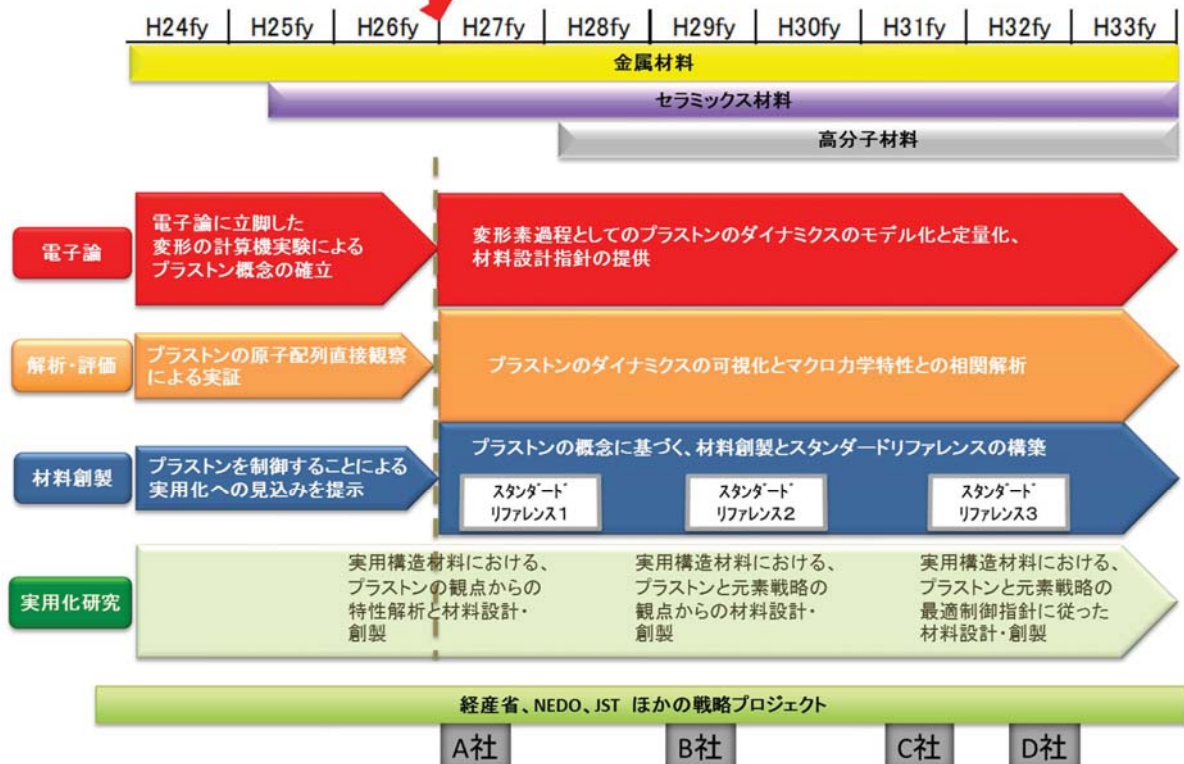
実用化研究【民間企業】

経産省プロジェクト

NEDO希少金属代替プロジェクト

JST ALCA『産学共創の場』

年次計画



元素利用の歴史と元素戦略の将来展望

元素戦略運営統括会議主査
プログラムディレクター
奈良先端科学技術大学院大学
理事・副学長 村井 眞二

1. 元素戦略の特質—技術と科学の2正面が—

元素戦略には2つの正面がある。1つは技術開発としての元素戦略で、もう1つは科学の進歩を図る元素戦略である。まず、第一の正面は、諸元素の入手困難となる事態に備え、供給リスクの緩和を目指す方策であり、社会的期待に応え、直接的な効果を目的とする。文明の領域での活動であり、科学に基づく技術の開発が主となる。もう一方、第二の正面は、諸元素が持つ未開発の魅力を引き出し、新しい世界をつくる方策である。未踏領域での活動であり、得られた成果は新しい知識をもたらすが、直接役立つかは未知数で、その後の発展による。これは文化の領域での活動であり、新しい知識の集積が成果となる。

この2つの正面、技術の開発と科学の進展はいずれも人類の将来にとって基本的に重要であり、来たるべき持続可能な社会の実現に貢献する。一般的に元素戦略といえば、社会的要請に応じていく科学をベースとした技術の面で語られることが多い。もっとも、物質を扱う分野では科学と技術が互いに重なり合うほど近いこともあり、あえて区別する必要がない場合が多い。

2. 元素戦略の概要

元素危機は必ずやってくる。すでにそこまで来ているといっても過言ではない。1980年ごろまでのモノ・資源は無限という時代、2000年頃までのモノ・資源は有限であり、その高度利用に努めた時代、2010年頃からはモノ・資源の不足が顕在化しつつある時代に入った。時代はまだ大競争時代が続いているが、やがて経済原理とは別のグローバルな協調と棲み分けの時代へと移行する必要がある。

現代の高度化社会の先端を支えている有用な材料にはあらゆる元素が利用されているが、問題となる製品と元素の例を示す。

永久磁石 Dy, Nd

二次電池 Li, Co

排ガス触媒 Pt, Rh

自動車鋼板 Nb, Mo

透明電極・電子材料 In, Ta

これらに使用されている金属元素は希少金属（レアメタル）であり、中でも希土類（レアアース）には安定供給が懸念されるものが多い。元素供給制限からくる社会疲労を回避するために、これらの元素の使用量を削減したり、これらの元素の機能を他の元素で代替するための科学と技術の展開が望まれる。これらの活動が元素戦略であり、世界へ発信しつつある日本発のコンセプトである。我が国に緒を發した元素戦略のコンセプトは、今では欧州で、続いて米国での活動に広がり、グローバルな流れとなりつつある。

元素戦略の目標は持続可能社会の形成に貢献することであるが、具体的には次のように整理できる。

1. 資源限界を超えて持続可能な社会を目指す戦略
 - 産業に資する材料セキュリティ、鉱物資源セキュリティ
 - 省エネ・環境保全に資する材料技術
 - 「元素」に焦点→サイエンスベースで目的を達成
2. 新たな物質材料基盤技術をひらく戦略
 - 「新材料設計・探索」のサイエンスの発展
 - ナノ・材料分野の新しい研究開発戦略
 - 融合・連携・横断を推進する新体制
3. 世界から尊敬され、かつ国益をもたらす戦略
 - サイエンスをベースにした人類的課題の解決

このように考えると元素戦略は単に課題解決型の戦略でないことは明らかである。

さらに、元素戦略研究のいくつかの特色を挙げると

1. 科学技術の「分野」ではない。もとより専門分野もなく、専門家もいない。
2. 研究の動機や条件の設定が従来とは異なる。→新しいサイエンスが生まれるチャンス
3. 今までと違う文化→多方面に影響を持つ。
4. 課題としてシャープなゴールを設定する 경우가多く、それに応じた費用対効果の検証が必要。

数件や十数件の研究成功は、すばらしいがそれでも大きなゴールには程遠い。社会の変革に影響を持つまでには膨大な成果の積み重ねが必要である。長い年月にわたる不断の活動が必要である。

3. 元素戦略の歴史上の先例

いくつかの先例を歴史上に見ることができる。それぞれの活動の動機は異なる。

中世の錬金術はありふれた金属からの金の製造を目指していた。よく知られている中東の錬金術は富の創出を目的とした。同じころ、中国でも錬金術が行われており、これらは不老長寿の薬の創出を目的としていた。余談であるが、その薬は道教では金丹（ジンタン）と呼ばれていた。当時の中国では金の発音は現在の「ジン」ではなく、「キム」であった。中国の錬金術がシルクロードを経て、タシケントかサマルカンドあたりで中東の錬金術と交流する時、その KIM（金）の音も伝わった。これがアルケミーのケミの語源だとする説がある。錬金術は不可能ということは現代科学で自明であるが、「元素を創る」のではなく、「元素の機能を創る」という思想は現在の元素戦略に通じるところがある。

19世紀末に「20世紀には窒素肥料不足から食料不足が起こるだろう」という有名なクルックス卿のロイヤルソサイエティでの講演があった。これを受け、20世紀初頭に多くの研究が行われ、10数年後にハーバーとボッシュによる空気中窒素の触媒的固定方法が開発された。今や、生物による窒素の固定に匹敵する量の窒素がハーバー・ボッシュ法により固定され、地球上の人類生存の基盤となっている。なお、現在では、3大肥料の残りの2つ、とくにリン化合物資源の不足が予測されている。この課題は、例えば廃水からのリンの回収などの研究が行われているものの、まだほとんど未解決のままである。

現在になって、環境保持・健康保持の観点からの元素の使用に対する規制が広く行われるようになった。これを受けて、電気配線接合のはんだについての鉛フリーはんだが開発され、スズを用いない船底塗料が開発されるなど成功例は多い。世界規模での協同作業の始まりとして低炭素社会へのアプローチ

がある。化石資源の供給不足と環境面での二酸化炭素排出抑制について炭素税設定など国際的な話し合いが行われている。炭素に留まらず、将来的にはいくつかの元素についてこのような国際的な協議が必要となってくるであろう。

金属不使用・脱金属の成功例も多い。コピー機のセレンドラムは有機系帯電材に置き換わった。希土類化合物に電子線を照射して像を描いていたブラウン管テレビは液晶テレビ、さらには有機 EL テレビに移っていく。航空機の機体構造材に炭素ファイバー材が使用されるようになった。テレビといい、航空機といい、当初は誰もがここまで来るとはとても想像できなかったところである。

4. 元素戦略の取り組み

希少元素・規制元素の使用量を極限まで低減すること、豊富で無害な元素により目的機能を代替すること、さらに種々の元素が発揮する新機能の設計や探索を通じて、特定の元素に依存せずに材料の様々な機能の実現を目指す。加えて、元素使用上の規制の回避、あるいは積極的に規制そのものを新たに設定することにより、課題解決のハードルを高くする。この高いハードルを超える技術の開発・イノベーションにより我が国の先導性・国益を確保しつつ、世界にとっての利益を追求できるところとなる。

これらをまとめたのが次の表である。

元素戦略の構成	
希少元素	規制元素
減量戦略	使用量の極小化
循環戦略	リサイクル 元素循環 再生 部品分別リサイクルを想定した製品設計
代替戦略	同一機能の他元素による実現（金属フリー化も含む） 希少元素代替 有害元素代替 炭素資源代替 別ルートによる同一機能の実現（ショートカット、回避） ありふれた元素による新機能の実現
規制戦略	戦略的規制 機能代替 国益と尊敬の両立 環境保全で世界に貢献 イノベーションドライバーとしての規制
新材料・新機能の創成	元素の特性に基づく新領域の開拓
(さらに政策と関わる以下も重要である。)	
資源戦略	鉱区の権益、探鉱 選鉱・分離・抽出・精錬技術の革新 科学技術外交と資源外交の中長期プログラム

元素戦略に基づく実際の研究開発は様々な形があり得る。その中で当然の指針をどう生かすかが鍵となっている。

 元素戦略のガイドライン

重元素から軽元素へ
 貴金属からありふれた金属へ
 希少元素からどこにでもある元素へ
 金属元素の使用から金属元素フリーへ
 漸新型・調査型研究から飛躍型・ハイリスク型研究へ
 国際的視点で研究の方向の選択を

政策の誘導による研究開発支援も重要である。我が国には「軍需」がなく「金に糸目をつけない最先端機能製品」の市場がない。特段の研究支援が望まれる。加えて、先端商品が世に出るときの政策による後押しが重要である。エコカーや自然エネルギー発電補助のように、いずれ「元素エコ商品」という支援があってほしいものである。

5. 元素戦略イニシアティブ—文部科学省の政策

元素戦略の提案は2004年科学技術振興機構未来戦略ワークショップにて40名の材料科学の専門家の討議の中で出された（中村栄一、玉尾皓平）。翌年の新材料設計・探索ワークショップでは現代の錬金術ユビキタス元素戦略の考え（細野秀雄）でさらに強化された。この後、文部科学省をはじめ、経済産業省や内閣府も参加した形の活動に発展し、やがていくつかの具体的な国の政策に結実することになる。

文部科学省は2007～2009年の3年間、各年数件「元素戦略プロジェクト」を公募した。採択された16件の課題からいくつかを下に示す。

- 脱貴金属を目指すナノ粒子自己形成触媒の開発
- 低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発
- アルミ陽極酸化膜を用いた次世代不揮発性メモリの開発
- 有機分子を活物質に用いた二次電池の高性能化（有機系）
- エコフレンドリーポストリチウムイオン二次電池の創製（無機系）
- 亜鉛に替わる溶融Al合金系めっきによる表面処理鋼板の開発
- ケイ素酸素系化合物の精密合成による機能設計

一方、2008年に文部科学省科学研究費補助金に期限付き（分科）細目として「元素戦略」が設けられ、基盤研究Cが3年間公募され、合計200数十件の応募があった。残念ながらこの期限付き細目が正規の分科細目には移行しなかったが、現在でも正規細目への移行が強く望まれている。

文部科学省／科学技術振興機構では「元素戦略」の戦略目標のもと、2010年からCREST（研究総括玉尾皓平）とさきがけ（研究総括 細野秀雄）の公募が始まり、募集は2012年まで行われる。CRESTの2010年と2011年の採択課題を簡略化し、下に示す。

- 環境材料としての導電性ダイヤモンドの新機能

- 異常原子価および特異配位構造の新物質の探索と新機能
- 結晶構造制御による Fe 基新磁性化合物の探索
- 軽元素戦略に基づく鉄鋼材料のマルチスケール設計原理の創出
- 有機材料を用いた次世代強誘電物質科学の創成
- 元素間結合を基軸とする新機能性物質・材料の開発
- 有機合成用鉄触媒の高機能化
- 軽元素を活用した機能性電子材料の創出
- ネオジム磁石の高保磁力化

さらに新たな元素戦略・拠点形成型という施策が 2012 年に開始された。全国で 1. 磁石材料 2. 触媒・電池材料 3. 電子材料 および 4. 構造材料 の研究開発を課題とする 4ヶ所の拠点をつくる。それぞれの拠点は主拠点と 2つの副拠点で構成され、この 3ヶ所のいずれかが 1. ものづくり 2. 計測 3. 理論 に主軸を置く。学理の構築と新材料創出という意欲的な研究の遂行のため、研究期間を 10 年間という長期とし、また有意な若手の参加を促すべく、参加研究者のプロジェクト課題への専念義務を軽減するなどの新しい試みが行われている。始動したプロジェクトと主拠点は次のとおり。1. [磁石] 元素戦略磁性材料拠点 (物質・材料研究機構)、2. [触媒・電池] 実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略拠点 (京大)、3. [電子材料] 東工大元素戦略拠点 (東工大)、4. [構造材料] 京都大学構造材料元素戦略研究拠点 (京大)。

6. 希少金属代替材料開発プロジェクト—経済産業省の政策

経産省では、元素戦略プロジェクトに対応する形で、希少金属代替材料開発プロジェクトまたはレアメタルプロジェクトを実施している。前身の経済産業省/金属鉱業事業団の時代からすでに数種の金属の備蓄を行っていた。これは主として鉄鋼用添加金属の価格変動に備えるものであった。元素の資源上の供給制限が表面化するに従い、経産省は 2006 年に供給、需要、カントリーリスクなどの評価軸での調査に基づき、将来の入手不安が想定される 31 種の元素 (鉱種) (レアアースは 1 種とみなした) を指定した。2007 年には「希少金属代替材料開発プロジェクト」を開始、元素を絞って、2007 年には W、In、Dy を、2009 年には Pt、Ce (レアアース)、Tb、Eu を対象とした。下に示す 11 課題で産学連携の研究が 5 年間行われ、それぞれの金属の使用量 50~80%削減という目標がほぼ達成されつつある。

- [In] ①透明電極向け In 使用量低減技術開発
- ②透明電極向け ITO 代替材料開発
- [Dy] ③希土類磁石向け Dy 使用量低減技術開発
- ④鉄 - 窒素系化合物を活用した新規永久磁石材料の開発
- [W]⑤超硬工具向け W 使用量低減技術開発及び代替材料開発 - 1
- ⑥超硬工具向け W 使用量低減技術開発及び代替材料開発 - 2
- [Pt]⑦遷移元素による白金族代替技術及び白金族の凝集抑制技術を活用した白金族低減技術の開発
- ⑧ディーゼル排ガス浄化触媒の白金族使用量低減化技術の開発

[Ce]⑨代替砥粒及び革新的研磨技術を活用した精密研磨向け Ce 低減技術の開発

⑩ 4 BODY 研磨技術開発の概念を活用した Ce 使用量低減技術の開発

[Tb, Eu]⑪高速合成・評価法による蛍光ランプ用蛍光体向け Tb、Eu 低減技術の開発

経産省では希少金属種の国家備蓄や安定供給取組などを資源エネルギー庁や石油、天然ガス、金属鉱物資源機構（JOGMEC）等を中心に行っている。とくに 2010 年には代替材料開発や海外鉱山開発・権益確保など（補正予算で 1000 億円）、2011 年にはレアアース代替技術や国内分離精製技術の開発支援（補正予算で約 3000 億円）など積極的な政策を行っている。

さらに 2012 年には新しく開始された「未来開拓研究」の 1 つとして「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」プロジェクトが取り上げられ、10 年間という長期の研究期間が予定されている。

7. 関係府省の連携

2007 年に開始された文科省の「元素戦略プロジェクト」と経産省の「希少金属代替プロジェクト」では準備段階から両省の連携が計られ、例えば経産省に応募のあった研究課題申請を基礎研究の要素が強いなどの場合は文科省への応募として取り扱うことなどが合意された。ここまで踏み込んだ省間の連携はかつてなかったものである。全体像を議論する委員会（「元素戦略・希少金属代替材料研究開発合同戦略会議」）が立ち上がり、内閣府も加わった「合同公開シンポジウム」が行われ、これは以来毎年開催されている。

2012 年に開始された文科省の「元素戦略・拠点形成型」と経産省の「未来開拓研究」は前述のようにいずれもハイリスク型研究で 10 年間という長期研究開発を想定している。両プロジェクトの共通部分「新しい磁石材料の開発」課題での連携を深めるための合同委員会（ガバニングボード）が設置され、さらにこの委員会の対象や機能の拡大が検討されている。

8. 元素戦略の欧米での施策

まず、用語について。レアアースは希土類元素のことで世界で広く使われている学術用語である。一方、レアメタルは和製英語で国際的には通用しない。希少元素のことは場面に応じて、ノブルメタルとかプリシヤス（貴重）メタルとかマイナーメタルとかが用いられる。さらにクリティカルマテリアルズという表現もある。

2004 年に JST 研究開発戦略センターのワークショップで元素戦略の重要性を指摘した。当時、欧米にはこのような動きはまだなかった。日本がコンセプトで先導したのは日本が先端材料の先進地であり、従って課題先進国でもあったためといえよう。

米国での主な動きとして、まず 2007 年に全米アカデミーの研究評議会が「鉱物、制限のある鉱物、と米国経済」という報告を公表した。2009 年米通商代表部が中国に対し、「鉱物資源の輸出を不当に制限」として世界貿易機構（WTO）に提訴した（のち 2011 年に中国敗訴の評定）。米国エネルギー省（DOE）は 2010 年、2011 年と連続で希少元素戦略に関する報告書を発行、研究開発や国際協力の提案を行った。これら報告書では 9 種、すなわち、Li、Mn、Co、Ni、Ga、Y、In、Te、および RE（レアアース）を鍵物質とした。さらに、2012 年秋には、米国 DOE は Innovation Hub for Critical Materials research（クリティカルマテリアル研究の革新）という公募研究を行う。5 年間で約 120 億円の予定。この提案の基

となったのは2011年の「クリティカルマテリアルズ戦略」であり、日本の政策が直接影響している。

欧州委員会（EC）の専門家グループがECの第7次枠組み計画（FP7）の下、2010年に14種の鉱物資源について供給制限が予想されるとの報告書をまとめた。それらは、Sb、Be、Co、CaF₂、Ga、Ge、C（グラファイト）、In、Mg、Nb、PGMs（白金族元素）、RE（レアアース）、Ta、Wとなっている。同時に希少元素の使用量削減や代替材料開発などの公募課題を設定した。さらに、2012年には日-EU戦略的国際共同研究プログラムとして「希少元素代替材料」研究の公募が始まる。日欧両サイドでそれぞれ1課題2億円で3件採択、研究期間は3年間。

これらの動きの結果、2011年10月、ワシントンDCにおいて、次いで2012年3月、東京において、日米欧による3極会議が2回開催され、課題を共有する活動が行われている。3極が足並みをそろえて、2011年に再び中国を「希土類などの不当な輸出制限」としてWTOに提訴した。

一方、中国は自国資源、とくに希土類を戦略的物質とみなし、1990年代の終わり頃からその採掘と輸出に制限を設けつつある。とくに、低価格生産による環境破壊の是正に力を入れ始めている。さらに、希土類を輸出するのではなく、それらを用いる先端材料の生産までを自国内で行うよう外国企業の誘導を計っている。なお、注目すべき新たな視点として、中国での自動車や電子機器の生産増大にともない、中国自身も希土類元素の不足に直面し、やがて中国も希土類元素などの輸入国に転じるという見方がある。こうなると、2010年代の半ばには世界的な需給関係はさらに複雑な様相を帯びてくると予想される。

9. 元素戦略の展望

希少元素はいつごろなくなるか、いつごろ「枯渇する」か。答えとして、なくなるとか枯渇するという日が来ることはないと言える。ただ、価格が上昇し、入手によるメリットがなくなるという状態はいずれ起こるということである。製品より高い価格の原料を購入することはない。価格上昇は、品薄はもちろん不採算鉱からの採掘によって引き起こされる。

元素資源の入手の困難は元素の種類で異なり、また生産時にどのような他の元素副産物をとまうかで個別的な事情が支配的である。あえて、全体の大きな流れをまとめると、次のような予想が可能となる。

元素危機の特徴		
短期的には	経済問題	需要と供給 投機
中期的には	南北問題	地政学的リスク 環境負荷容認の採掘 低賃金労力での採掘 都市への爆発的な人口集中
長期的には	資源問題	地球規模での管理基準必要 (合意できるか)

元素危機は短期的には経済問題であり、需要と供給のバランスに影響される。例えば、希土類の Dy

の価格は中国の輸出制限などにより急上昇したが、世界経済の不況で機能材料の生産が落ち込んだのを反映し、一時高止まりに見えた価格は反落している。さらに、日欧米で代替技術の開発が盛んになり、やがては有意な技術ストックが蓄積されるであろうとの見込みから投機筋も手控え模様である。これは「炭素戦略」で見られている状況であり、石炭の液化、ガス化という技術ストックが原油の無制限の価格上昇を防いでいることに似ている。

中期的には南北問題ともいえる。環境破壊としては、とくに中国南方でのイオン吸着鉱床の希土類採取方法が問題である。山全体に降雨または散水をし、目的鉱物を下部岩盤上に導き、さらに薬品（硫酸アンモニア水溶液）を山全体に注入し、ふもとのプールに鉱物液を集めるという、乱暴といえる方法で低価格採取や不許可採取を行っている。中国政府は強く改善策を打ち出している。このような環境保全努力が中国による希土類輸出制限の一因であることを輸入国も理解すべきであろう。

資源産業は大気、土壌、水を少なからず汚染する宿命を負う。これに加えて現状は、資源国に（有害な）残渣を残し、消費国は有用物のみ利用しているのが一般的なパターンである。加えて、チリの銅鉱山の低賃金労働、南アフリカの白金鉱山の劣悪な作業状況など問題は多い。やがて、資源生産国と消費国がテーブルについて協議すべき時期が来るであろう。

現在、世界の人口の約40%が都市人口である。人口増加に加えて、2040年には世界の人口の60%が都市人口になると言われている。都市生活者の急増に希少元素製品の生産が追い付かないのは明らかであり、この点からも消費国の安定成長は終わりつつあるといえよう。

長期的にどのような対策が可能か。低炭素社会を目指す「炭素戦略」で案出された国際社会における「炭素税」というコンセプトを先例として做う必要がある。限られた資源の有効利用のために国際協調と国際合意が望まれるが、その実現は容易なことではない。しかし、持続可能社会の実現に向け、この合意形成のための努力は不可欠のものであろう。

長期的な持続可能社会の実現に向けて、最も期待を集めるのが科学・技術の成果による解決策である。幸いにも、この四半世紀の間には、上述の最も深刻な資源問題としての元素危機は大きくのしかかってくることはない。この時間を無駄にしてはならない。切り札「元素戦略」に多くの若い研究者が情熱を持って参画することを期待したい。そして我が国も、国際社会も、この重要なしかしハイリスクである研究に参入する若い研究者に二重、三重の支援をすることを惜しんではならない。

参考資料

1. 細野秀雄, 神谷利夫「透明金属が拓く驚異の世界—不可能に挑むナノテクノロジーの錬金術—」, ソフトバンククリエイティブ (2006)
2. 村井眞二「元素戦略の推進を」, 化学と工業, 60, 169 (2007)
3. 中山智弘「元素戦略—希少元素・規制元素・有害元素等の代替へ向けた戦略—」セラミックス, 42,7 (2007)
4. (独) 科学技術振興機構研究開発戦略センター, 戦略イニシアティブ「元素戦略」CRDS-FY2007-SP-04 (2007), および引用文献
5. (独) 産業技術総合研究所レアメタルタスクフォース編「レアメタル—技術開発で供給不安に備える—」, 工業調査会 (2007)
6. (独) 物質・材料研究機構編・発行「元素戦略アウトLOOK—材料と全面代替戦略—」 (2007)

7. 田中和明「図解入門。よくわかる最新レアメタルの基本と仕組み—用途、製造技術、リサイクルの基礎知識。初歩から学ぶレアメタルの常識」
8. 原田幸明, 河西純一「動き出したレアメタル代替戦略」日刊工業新聞 (2010)
9. E. Nakamura, K. Sato「Managing the Scarcity of Chemical Elements」Nat. Mater. 10,158(2011)
および続くエディターのコメント2報
10. 中村栄一「元素戦略：歴史観・世界観に裏打ちされた科学研究」, 化学と工業 65, 1(2012)