

平成 17 年度
防衛装備の高度化に貢献するナノテク技術と
その民生利用に関する調査研究報告書

平成 18 年 3 月

社団法人 日本機械工業連合会
株式会社 三菱総合研究所

序

我が国機械工業における技術開発は、戦後、既存技術の改良改善に注力することから始まり、やがて独自の技術・製品開発へと進化し、近年では、科学分野にも多大な実績をあげるまでになってきております。

しかしながら世界的なメガコンペティションの進展に伴い、中国を始めとするアジア近隣諸国の工業化の進展と技術レベルの向上、さらにはロシア、インドなどBRICs諸国の追い上げがめざましい中で、我が国機械工業は生産拠点の海外移転による空洞化問題が進み、技術・ものづくり立国を標榜する我が国の産業技術力の弱体化など将来に対する懸念が台頭してきております。

これらの国内外の動向に起因する諸課題に加え、環境問題、少子高齢化社会対策等、今後解決を迫られる課題も山積しており、この課題の解決に向けて、従来にも増してますます技術開発に対する期待は高まっており、機械業界をあげて取り組む必要に迫られております。

これからのグローバルな技術開発競争の中で、我が国が勝ち残ってゆくためにはこの力をさらに発展させて、新しいコンセプトの提唱やブレークスルーにつながる独創的な成果を挙げ、世界をリードする技術大国を目指してゆく必要があります。幸い機械工業の各企業における研究開発、技術開発にかける意気込みにかげりはなく、方向を見極め、ねらいを定めた開発により、今後大きな成果につながるものと確信いたしております。

こうした背景に鑑み、当会では機械工業に係わる技術開発動向等の補助事業のテーマの一つとして株式会社三菱総合研究所に「防衛装備の高度化に貢献するナノテク技術とその民生利用に関する調査研究」を調査委託いたしました。本報告書は、この研究成果であり、関係各位のご参考に寄与すれば幸甚です。

平成18年3月

社団法人 日本機械工業連合会
会長 金井 務

はしがき

本報告書は、日本自転車振興会から自転車等機械工業振興事業に関する補助金の交付を受けて社団法人日本機械工業会が行った「平成17年度機械工業に係る技術開発動向等の調査補助事業(先端技術予測調査)」の一環として、株式会社三菱総合研究所が受託した「防衛装備の高度化に貢献するナノテク技術とその民生利用に関する調査研究」の成果を取りまとめたものである。

現在、我が国の防衛装備は防衛庁技術研究本部が基礎研究から応用研究・試作まで担っているが、基礎からの自主的な研究はほとんど行われておらず、民生技術の防衛への応用が主流である。従って、民間企業等が行うナノテク研究と防衛分野への応用のマッチングが進んでいないのが現状である。

一方、米国においては政府における軍事技術の開発成果の一部が民生用機器等に転用され、産業技術として活用されるなど、公共分野における技術開発は国内産業技術の高度化に大きく貢献している。(有名な例として、過去にIT技術やGPSシステムが軍事用に開発され、民生転用されている。)

本調査では、現在又は将来必要となる防衛装備技術(防衛装備にスピンオンされうるような技術)に貢献できるナノテクについて調査を進めるとともに、当該技術の民生利用についてその転用先、波及効果等について検討し、もって機械工業産業の効率的な技術の向上に資することを目的として調査を実施した。

本調査を実施するにあたり、日本自転車振興会並びに社団法人日本機械工業連合会のご高配に深謝するとともに、格別のご指導をいただいた経済産業省、ご協力頂いた関連企業、関連団体に対し、心から謝意を表するとともに、本報告書が今後の防衛装備技術やその民生利用、ひいては機械工業産業の効率的な技術の向上に貢献できれば幸甚である。

平成18年3月

株式会社 三菱総合研究所
代表取締役社長 田中 将介

序

はしがき

総論

1. 防衛装備の高度化研究を巡る課題の整理	
1. 1 防衛関連研究開発予算の日米比較	1
1. 2 防衛産業の規模と防衛受注割合の比較	7
1. 3 産業競争力強化の手段としての防衛関連 R&D	10
1. 4 我が国防衛装備の高度化のための課題	16
1. 5 府省連携によるプログラムデュアルユース技術開発の提案	17
2. 防衛分野と民生分野の両方で使用可能なナノ技術領域の抽出	
2. 1 米国 DoD のナノテクノロジー関連研究開発戦略	21
2. 2 米国 DARPA におけるデュアルユース研究	24
2. 3 米国兵士ナノテクノロジー研究所における研究開発	36
2. 4 我が国におけるデュアルユースが期待されるナノ技術領域	43
3. 防衛装備として必要なスペックの設定	
3. 1 バイオテロ用防護服	46
3. 2 自走式爆発物センサー	47
3. 3 災害用高性能人体センサー	47
3. 4 超軽量耐熱材料	48
4. スペックをクリアするためのナノ技術開発課題の整理	
4. 1 バイオテロ用防護服	49
4. 2 自走式爆発物センサー	49
4. 3 災害用高性能人体センサー	50
4. 4 超軽量耐熱材料	50

5. 技術開発の民生用途への波及効果と新規市場創出規模等経済効果の検討

5. 1	バイオテロ用防護服	51
5. 2	自走式爆発物センサー	51
5. 3	災害用高性能人体センサー	51
5. 4	超軽量耐熱材料	51

総論

現在、我が国の防衛装備は防衛庁技術研究本部が基礎研究から応用研究・試作まで担っているが、基礎からの自主的な研究はほとんど行われておらず、民生技術の防衛への応用が主流である。従って、民間企業等が行うナノテク研究と防衛分野への応用のマッチングが進んでいないのが現状である。

一方、米国においては政府における軍事技術の開発成果の一部が民生用機器等に転用され、産業技術として活用されるなど、公共分野における技術開発は国内産業技術の高度化に大きく貢献している。(有名な例として、過去に I T 技術や G P S システムが軍事用に開発され、民生転用されている。)

本調査研究では、現在又は将来必要となる防衛装備技術（防衛装備にスピノンされるような技術）に貢献できるナノテクについて調査を進めるとともに、当該技術の民生利用についてその転用先、波及効果等について検討し、もって機械工業産業の効率的な技術の向上に資することを目的として、以下を実施した。

(1) 防衛装備の高度化研究を巡る課題の整理

第 1 段階として、防衛関連研究開発予算の日米比較、防衛産業の規模と防衛受注割合の比較、産業競争力強化の手段としての防衛関連 R&D など、我が国防衛装備の高度化のための課題を整理し、課題を回避しうる仕組みとして、府省連携によるプログラムデュアルユース技術開発の提案を行なった。

(2) 防衛分野と民生分野の両方で使用可能なナノ技術領域の抽出

米国 (DOD : ナノソルジャー、DARPA、など) の動向や考え方を整理した上で、日本の国情を踏まえ、防衛分野と民生分野の両方で使用可能なナノ技術領域を抽出した。

(3) 防衛装備として必要なスペックの設定

上記で抽出したナノ技術領域について、防衛装備として必要なスペックを設定した。

(4) スペックをクリアするためのナノ技術開発課題の整理

上記スペックを実現するための中核技術としてのナノテクノロジー関連技術開発課題 (要素課題) と研究開発動向を整理した。

(5) 技術開発の民生用途への波及の検討

抽出した技術開発課題が、民生用途としてみた場合に、どのような活用の可能性（市場展開）があるかを整理し、また、新規市場創出規模等経済効果について検討した。

1. 防衛装備の高度化研究を巡る課題の整理

米国は、同時多発テロや対イラク戦争などの勃発により、2002年度から2004年まで、対前年比10%を優に超える予算増額措置を行なった。2005年度は若干落ち着く気配を見せているが、1999年代後半に比べ、2000億ドルを超える規模の予算増額となっている。国防費の対GDP比率も1998年度の3.0%から、2003年度時点で3.5%、2005年度では4%近くになっていると想定される。これは、先進国中抜きん出て高い。

この予算中の国防関係R&D予算は、全国防費の14%内外で推移している。若干古いデータではあるが、科学技術政策研究所(NISTEP)の報告では、DODの研究開発費が全連邦研究開発費の半分近くを占めている。米国R&Dにおける国防R&D比率は極めて高い。

一方、日本の防衛関連予算は年間5兆円弱の規模で推移しており、GDPの約1%である。このうち、2000年以降の研究開発費は、1200-1600億円程度であり、全体の2-3%程度である。

日本の防衛関連R&Dを米国と比較すると、以下が見てとれる。

- 米国の国防費は近年増加の一途をたどり、2005年度では4700億ドルを越える。この伸びにほぼ追随する形で研究開発費も増加しており、2005年度段階では700億ドル規模(14%程度)となっている。
- 先端研究推進の側面が大きいDARPAの予算に限定しても30億ドル規模の年間予算がある。
- 一方で日本の場合、防衛予算そのものが5兆円規模と、米国の1/10以下であるにもかかわらず、防衛費に占める研究開発予算も3%未満と、米国の1/5程度である。
- 結果的に、我が国の防衛関連研究開発予算規模は、米国の1/50程度となっている。DARPAの予算規模と比較しても、我が国の防衛関連研究開発予算は1/3程度である。

1. 1 防衛関連研究開発予算の日米比較

(1) 米国国防関連R&D予算の概要

図1. 1に米国の1996年度から2005年度に欠けての国防費の推移を示す(平成12年度—17年度の防衛白書より作成)。元々米国は、冷戦終結を受け2500億ドル規模に削減していた国防費について、2000年度から2005年度にかけて約1,100億ドルの増額を行う計画を明らかにしていたが、同時多発テロや対イラク戦争などの勃発により、2002年度から2004年まで、対前年比10%を優に超える予算増額措置を行なった。2005年度は若干落

ち着く気配を見せているが、1999 年代後半に比べ、2000 億ドルを超える規模の予算増額となっている。国防費の対 GDP 比率も 1998 年度の 3.0%から、2003 年度時点で 3.5%、2005 年度では 4%近くになっていると想定される。これは、先進国中抜きん出て高い。

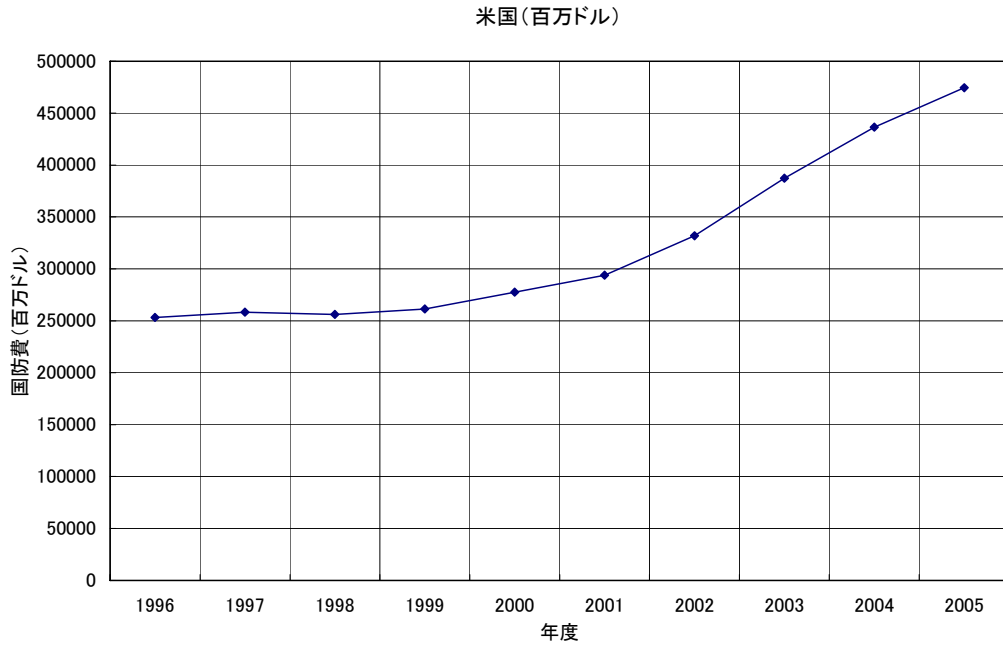


図 1. 1 米国の 1996 年度から 2005 年度に欠けての国防費の推移
(平成 12 年度—17 年度の防衛白書より作成)

図 1. 2 は、米国の各年度の予算教書に基づき、2001 年度から 2007 年度の国防費のうち、研究開発及び試験評価に要する予算（2006 年度以降は予測値）を示したものである。また、図 1. 3 は国防費に占める研究開発及び試験評価の予算の比率を示したものである。国防費の増加に呼応して、ほぼ同じ比率で研究開発費が増加していることが見てとれる。

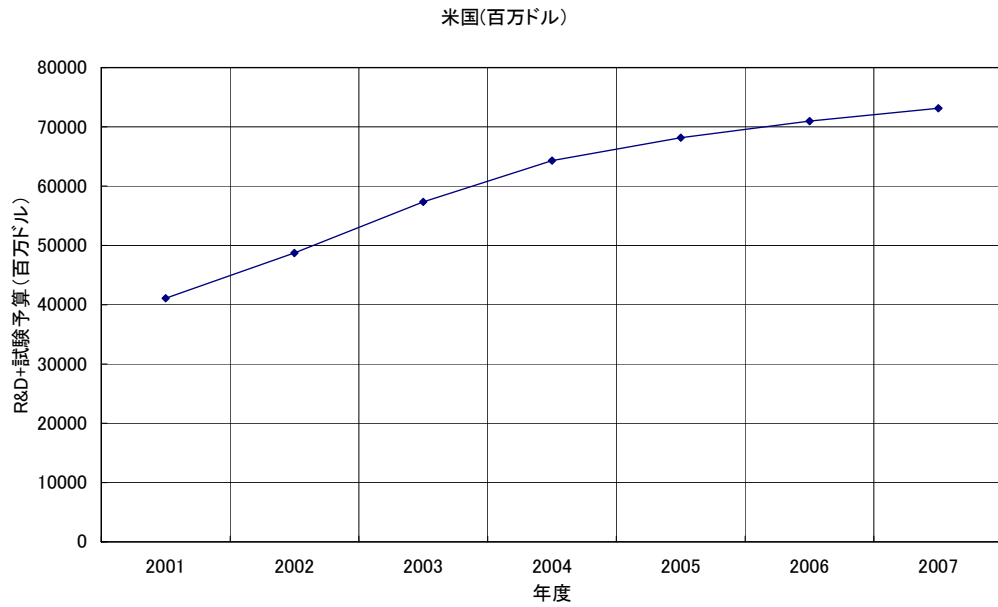


図 1. 2 国防費中研究開発及び試験評価に要する予算 (2006 年度以降は予測値)

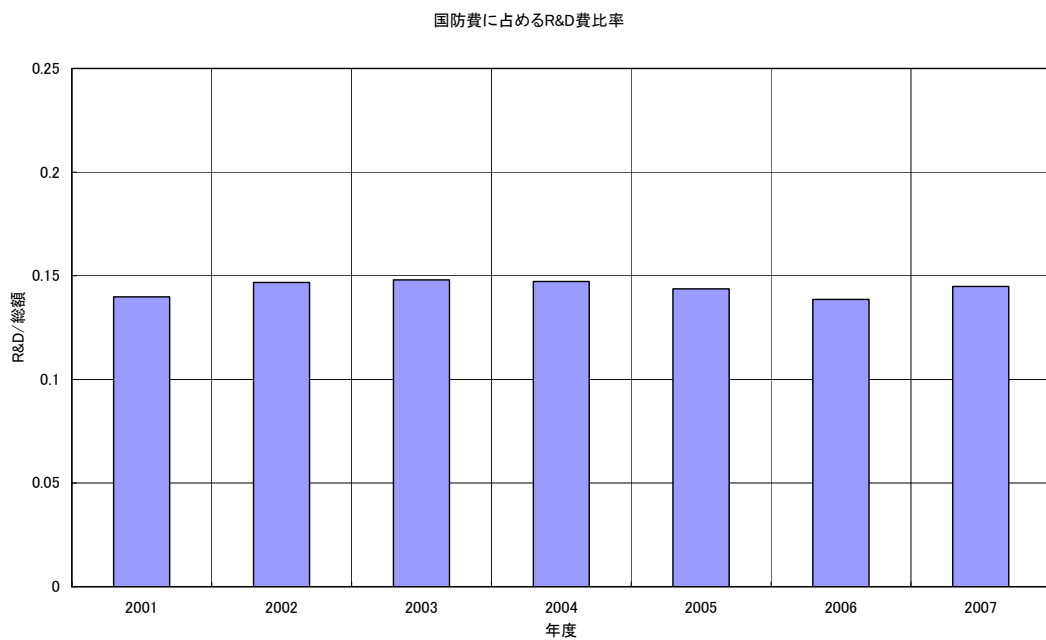


図 1. 3 米国防費に占める R&D 関連予算比率の推移

若干のばらつきはあるが、国防関係 R&D 予算は、全国防費の 14%内外で推移している。この国防関係 R&D 予算が、他の米国機関の予算と比較してどの程度を占めているかについて、若干古いデータではあるが、科学技術政策研究所 (NISTEP) が報告しているものを図 1. 4 に示す。これは、AAAS (R&D Budget and Policy Program) 提供データを

もとに NISTEP が作成したものであり、2002 年度の米国の総 R&D 予算 1029 億ドルのうち、DOD によるものが 487 億ドルと半分近くを占めている。米国 R&D における国防 R&D 比率が極めて高いことが分かる。

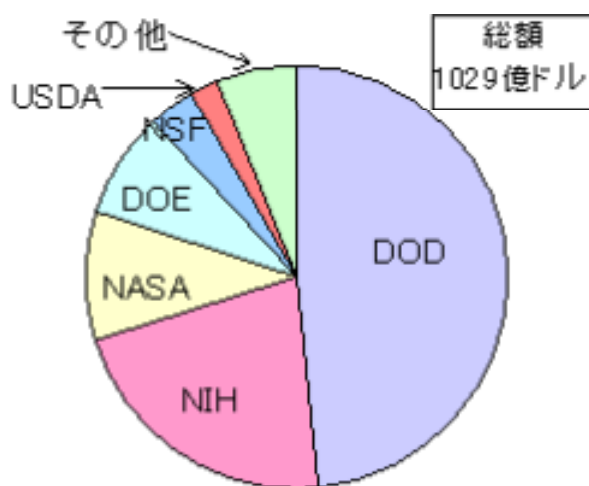


図 1. 4 2002 年度機関別 R&D 予算

出典：科学技術政策研究所 (NISTEP)

但し、ここで比較した DOD の R&D 予算には、いわゆる基礎研究、応用研究、開発研究といったいわゆる R&D のみならず、試験や評価に係る費用も含まれていることには留意する必要がある。

(2) 日本の防衛関連 R&D 予算の概要

日本の防衛関連予算の推移を図 1. 5 に示す。年間 5 兆円弱の規模で推移しており、GDP の約 1%である。

日本における防衛予算

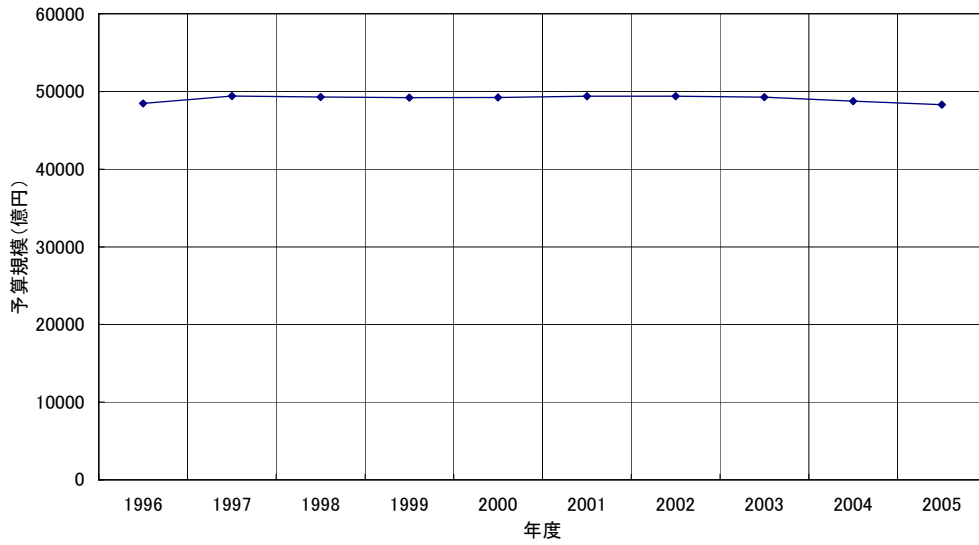


図 1. 5 日本の防衛関連予算の推移

(防衛白書各年度版に基づき三菱総研作成)

このうち、2000 年以降の研究開発費の推移を示したものが図 1. 6 である。年次により多少の変動はあるものの、1200-1600 億円程度である。また、図 1. 7 には、全予算に対する R&D 予算の推移を示す。

研究開発費(億円)

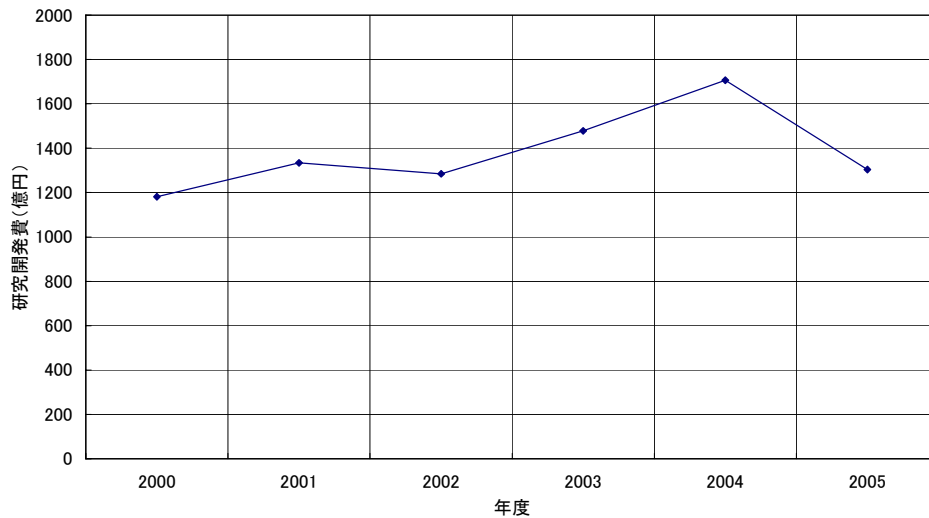


図 1. 6 2000 年以降の防衛関連研究開発費の推移

(防衛白書各年度版に基づき三菱総研作成)

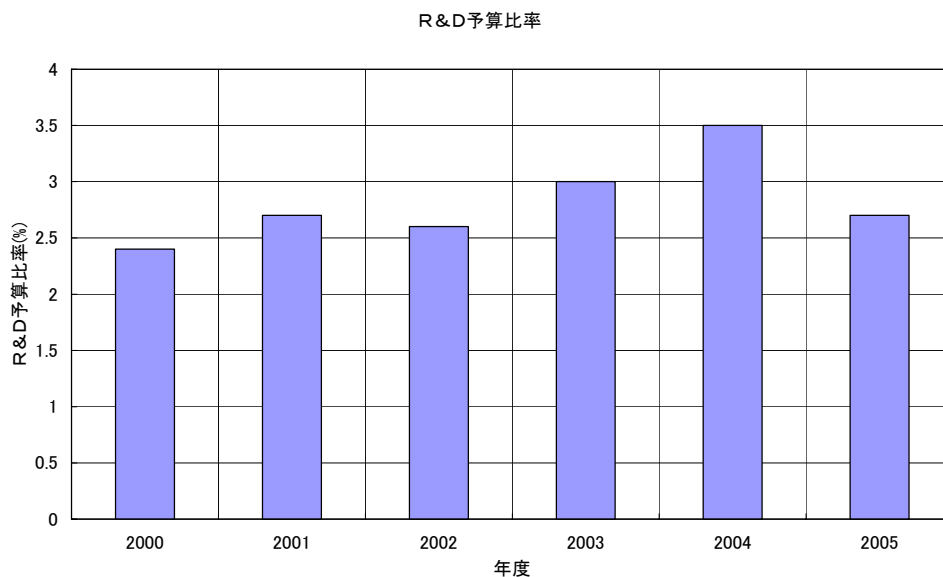


図1. 7 2000年以降の防衛関連研究開発費比率の推移

(防衛白書各年度版に基づき三菱総研作成)

(3) 米国と比較した日本の防衛関係R & D

日本の防衛関連R & Dを米国と比較すると、以下が見てとれる。

- 米国の国防費は近年増加の一途をたどり、2005年度では4700億ドルを越える。この伸びにほぼ追随する形で研究開発費も増加しており、2005年度段階では700億ドル規模(14%程度)となっている。
- 先端研究推進の側面が大きいDARPAの予算に限定しても30億ドル規模の年間予算がある。
- 一方で日本の場合、防衛予算そのものが5兆円規模と、米国の1/10以下であるにもかかわらず、防衛費に占める研究開発予算も3%未満と、米国の1/5程度である。
- 結果的に、我が国の防衛関連研究開発予算規模は、米国の1/50程度となっている。DARPAの予算規模と比較しても、我が国の防衛関連研究開発予算は1/3程度である。

1. 2 防衛産業の規模と防衛受注割合の比較

米国では、防衛産業上位企業であるロッキード・マーチンやボーイング、ノースロップ・グラマンなど、航空宇宙関連企業の防衛関連収入は、米国国防費の伸びに呼応して急激に増加している。他の企業についても堅調に増加している。また、近年、全般的に、防衛関連への依存度が増加している。特に、ロッキード・マーチン、レイセオンの2社は元々防衛比率が高めであったが、2002年以後は90%を優に超えるものとなっている。

一方日本の防衛関連企業については、日本の防衛費がほぼ同額で推移していることを踏まえ、企業の防衛分野からの収入もほぼ同額で推移している。なお、防衛関係国内最大手である三菱重工業でも、年間収入は25億～30億ドル規模であり、現在の米国大手に比べると、1/10規模である。また、防衛関連受注比率が高い三菱重工、川崎重工などでも、その比率は平均すると高々12%内外であり、電気関連では最も高い三菱電機で3%、NECや東芝では1-2%程度である。

(1) 米国

Defence Newsの1999-2004年版に基づき、米国の防衛産業上位企業について、図1.8に防衛関連収入の推移を示す。なお、判例中の()内の数字は、2004年度の収入世界順位である。

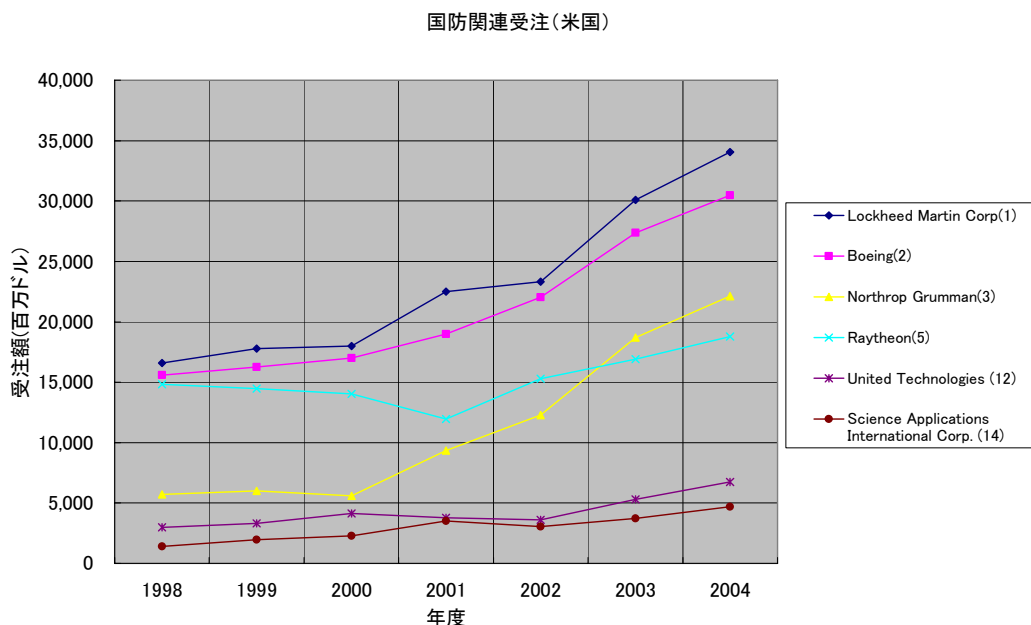


図1. 8 米国の防衛産業上位企業の防衛関連収入の推移

(Defence News 1999-2004年版に基づき三菱総研作成)

ロッキード・マーチンやボーイング、ノースロップ・グラマンなど、航空宇宙関連企業の防衛関連収入は、米国国防費の伸びに呼応して急激に増加している。他の企業についても堅調に増加している。

図1. 9は、これらの企業の全収入に対する防衛関連収入比率の推移を示す。

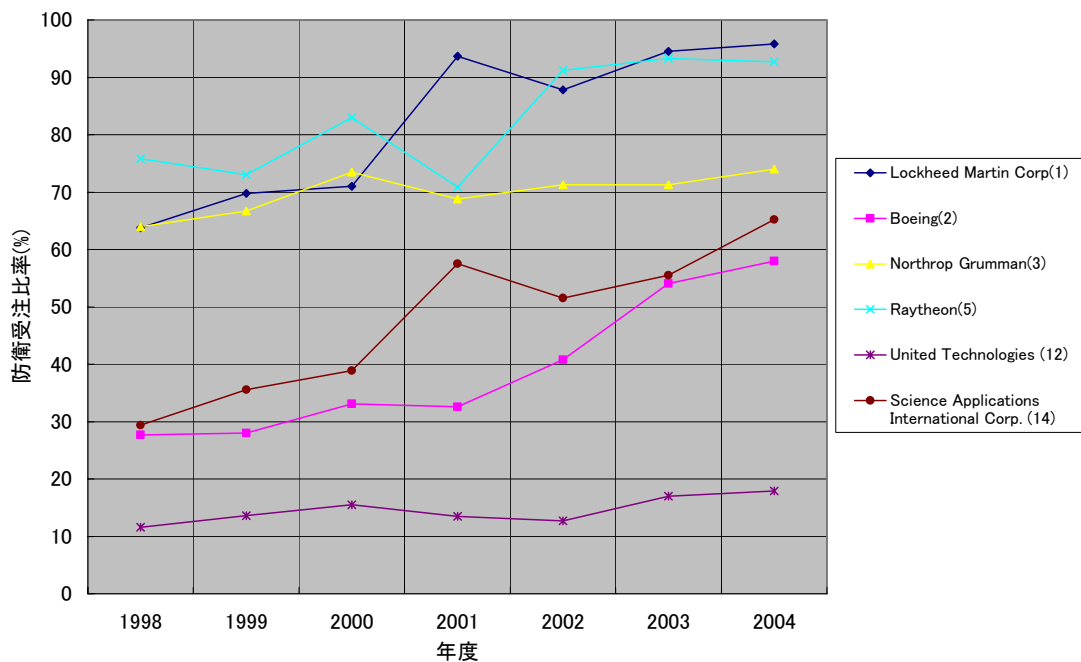


図1. 9 米国の防衛産業上位企業の全収入に対する防衛関連収入比率の推移
(Defence News 1999-2004年版に基づき三菱総研作成)

一般的に、防衛関連への依存度が増加している傾向が見てとれる。特に、ロッキード・マーチン、レイセオンの2社は元々防衛比率が高めであったが、2002年以後は90%を優に超えるものとなっている。

(2) 日本

日本の防衛関連企業について、図1. 10に防衛関係収入の推移を示す。なお、1998年と2000年についてはデータが無いものが存在するが、これらは、元のデータに欠損があったものである。日本の防衛費がほぼ同額で推移していることを踏まえ、これらの企業の収入もほぼ同額で推移していることが分かる。なお、防衛関係国内最大手である三菱重工業でも、年間収入は25億~30億ドル規模であり、現在の米国大手に比べると、1/10規模である。

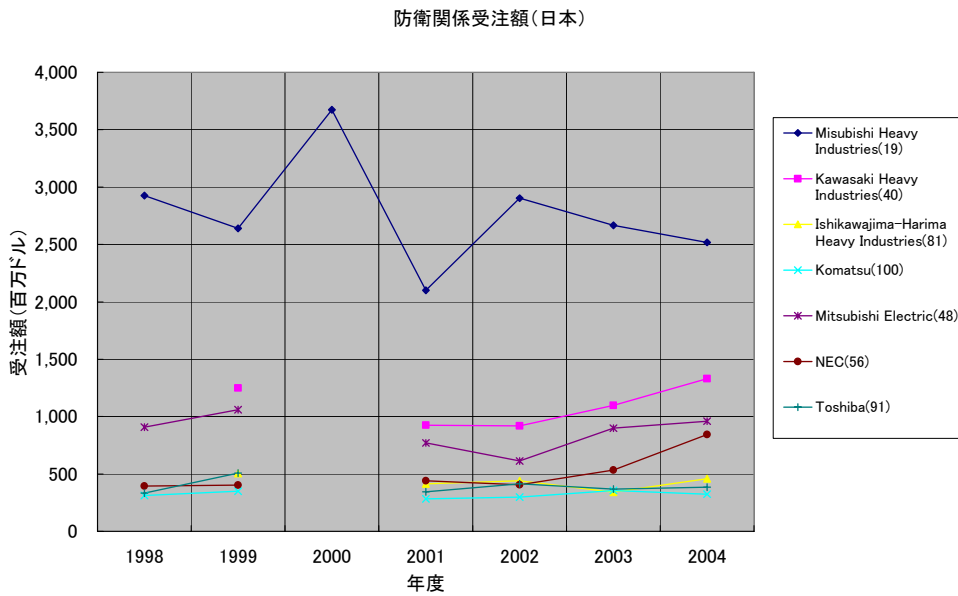


図 1. 10 国内防衛関連企業の防衛関係売上高の推移
(Defence News 1999-2004 年版に基づき三菱総研作成)

図 1. 11 は、これら国内防衛関連企業の総収入に対する防衛関連収入比率の推移を示したものである。

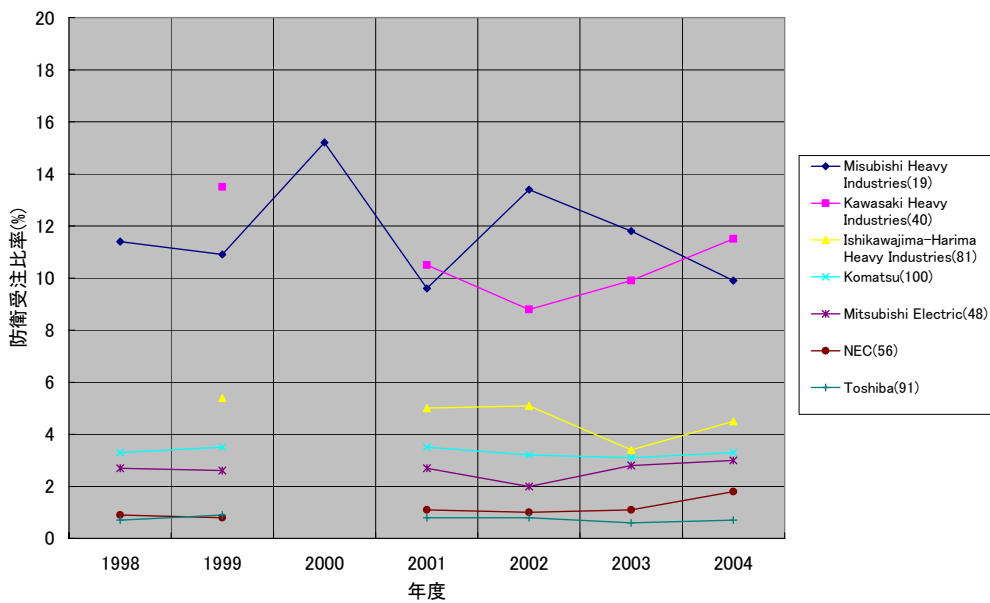


図 1. 11 国内防衛関連企業の総収入に対する防衛関連収入比率の推移
(Defence News 1999-2004 年版に基づき三菱総研作成)

防衛関連受注比率が高い三菱重工、川崎重工などでも、その比率は平均すると高々12%内外であり、電気関連では最も高い三菱電機で3%、NECや東芝では1-2%程度である。

1. 3 産業競争力強化の手段としての防衛関連 R&D

米国の航空宇宙産業は、軍からの受注依存度が極めて高く、企業としての存続の根幹が軍用機器の製造である。また、非常にシビアな運用が要求される軍用航空機で培った技術は民間用航空機の製造にも寄与しているといえる。軍用の性能本位製品の開発⇒コストパフォーマンスに優れた汎用製品の製造、という意味で、スピノフ型利用が進んでいるといえる。

防衛関連 R&D による産業競争力強化という面で、最も有名なものは、国防総省国防高等研究事業局 (DARPA) における研究開発であろう。

DARPA には7つの技術オフィスがあり、それぞれ多くの研究プログラムを推進している。DARPA の研究開発予算規模は DoD 全体の研究開発+試験評価予算規模の 1/20 程度であるが、それでも、30 億ドル規模であり、大学や民間にとって、決して無視できない規模である。

DARPANET など、情報通信分野の中核技術は、そもそも米軍の情報通信網の高度化のために開発されたものである。これらの技術が民間に開放され、世界の情報インフラに成長した。巨大なスピノフであるといえる。

この他にも研究開発の第1段階が DARPA にある産業技術は材料などでも多くの例がある。例えば、現時点で最強の耐熱繊維である PBO 系繊維も元々は米軍の要請でデュポンが開発をしたものである。

一方日本においては、防衛産業は、武器輸出三原則により、国内市場 (防衛庁) のみが対象となっている。また、防衛関連研究開発費も米国の 1/50 程度と、決して潤沢ではない。防衛産業・技術基盤研究会は、平成 12 年に、従来皆無に近かった大学などとの連携、官民間及び官官間での研究課題の分担、技術者の交流、研究経費の分担、研究施設の利用など、協力のあり方の見直しを行うことが必要であること、民間企業が防衛庁から委託された研究開発で得られた技術の民生転用を容易にすること、などを提言している。

(1) 米国

米国において、防衛関連 R&D 予算は、連邦政府の全 R&D の半分内外を占める莫大な

ものとなっている。この潤沢な研究開発資金による先端研究開発成果は、いうまでも無く米国の産業競争力を高める役割を果たしている。その端的な例は、航空宇宙産業である。

米国の航空宇宙産業は、軍からの受注依存度が極めて高く、企業としての存続の根幹が軍用機器の製造である。また、非常にシビアな運用が要求される軍用航空機で培った技術は民間用航空機の製造にも寄与しているといえる。軍用の性能本位製品の開発⇒コストパフォーマンスに優れた汎用製品の製造、という意味で、スピンオフ型利用が進んでいるといえる。

防衛関連 R&D による産業競争力強化という面で、最も有名なものは、国防総省国防高等研究事業局（DARPA）における研究開発であろう。

DARPA は、国防総省(DoD)のための研究開発組織である。DARPA は DoD のために選定された基礎研究、応用研究、および開発計画を推進することで、軍事的な役割の向上と米国の技術的優位性を保つことを目的としている。そのため、研究の学術的意義よりは技術的なインパクトを重視し、アイデアをプロトタイプシステムとして実現する研究を支援している。リスクは高いが実現すれば大きな成果が期待できるような研究を対象とすることが多く、ニーズ指向が強い。

DARPA には表 1. 1 に示す 7 つの技術オフィスがあり、それぞれ多くの研究プログラムを推進している。

表 1. 1 DARPA の技術オフィスと研究プログラム数

オフィス名称	研究プログラム数(2005 年時点)
The Advanced Technology Office (ATO)	40
Defense Sciences Office (DSO)	74
Information Processing Technology Office (IPTO)	19
Information Exploitation Office (IEO)	30
Microsystems Technology Office (MTO)	60
Special Projects Office (SPO)	27
Tactical Technology Office (TTO)	32

DARPA のプロジェクトにおいては、その立ち上げから運営に至るあらゆる過程において、プログラムマネージャに大きな裁量権が委ねられ、強力なリーダーシップによってプロジェクトが運営されているのが特徴である。このようなプロジェクトの運営方法を「プログラムマネージャ」方式と呼ぶ。

DARPA には約 240 人の職員がいるが、このうち、120~130 人がプログラムマネージャである。DARPA のプログラムマネージャの権限は非常に大きく、プロジェクトの策定、

立案、審査などをすべて自らの裁量で行なうことができる。提案の公平な審査のため、提案 1 件につき、3-5 名の外部査読者を付け、事前審査を共同で行なうものの、評価基準の設定や最終的な採否はプログラマネージャが決定する。ただし、自分のアイデアをプロジェクトとして立ち上げるためには、DARPA 内で 2 週間に 1 度の割合で開かれるプログラマネージャ・ミーティングで承認を得ることが必要である。プログラマネージャは、同僚のプログラマネージャ約 20 人を前に、実施したいプロジェクトのテーマや実施者、資金などについて発表し、コメントを求める。平均 3~4 回のミーティングを経て、一つのプロジェクトが立ち上がる。このような過程を経て、プログラマネージャは年間に 1 人平均 6~7 件のプロジェクトを立ち上げている。

DARPA のプログラマネージャはプロジェクトの策定、立案から遂行に至る全過程で非常に大きな裁量権をもつが、同時にその成果が自身の評価に直結するという厳しい職務である。また、現在運営しているプロジェクトの進捗管理をすると同時に、新しいプロジェクト策定のシーズとなるような専門分野の最新知識を得るため、年間の半分近くは大学や企業への出張に費やすことになる。こうした激務のため、任期は 4-6 年とされている。

“典型的”な技術プロジェクトは、4 年間にわたり 1000-4000 万ドルで構築されるが、“典型的”といっても様々で、100 万ドル以下のものもあれば 1 億ドルのものもある。

DARPA の予算規模は、2005 年度で 29 億 7700 万ドル、2006 年度要求額は 30 億 8400 万ドルである。ちなみに 2006 年度 R&D 予算の内訳は、1) 基礎研究を支援する防衛研究科学 (Defense Research Sciences) 1 億 3010 万ドル、2) 応用研究予算が 14 億 4250 万ドル、先端技術開発予算が 14 億 6170 万ドルである。尚、応用研究予算には、エレクトロニクス技術への 2 億 4200 万ドル、認知 (cognitive) コンピューティングシステムの 2 億 80 万ドル、情報通信技術への 1 億 9880 万ドル等が含まれているほか、先端技術開発予算には、センサー技術の 1 億 8950 万ドル、宇宙プログラム技術への 2 億 2380 万ドル等が盛り込まれており、先端技術開発予算であるからといって、必ずしも軍事的色彩が強くなるわけではない。

DARPA の研究開発予算規模は DoD 全体の研究開発+試験評価予算規模の 1/20 程度であるが、それでも、30 億ドル規模であり、大学や民間にとって、決して無視できない規模である。

DARPANET など、情報通信分野の中核技術は、そもそも米軍の情報通信網の高度化のために開発されたものである。これらの技術が民間に開放され、世界の情報インフラに成長した。巨大なスピンオフであるといえる。

この他にも研究開発の第 1 段階が DARPA にある産業技術は材料などでも多くの例があ

る。例えば、現時点で最強の耐熱繊維である PBO 系繊維も元々は米軍の要請でデュポンが開発をしたものである。

尚、2004 年度から DARPA では「Defense TechLink Program」をスタートし、特に非防衛産業への技術移転を進めている(2004 年度予算：3 百 547 千ドル)。このプログラムの中に、僅かではあるが、先端民生技術のスピンオン（汎用技術・製品の軍用目的利用）も予算化されている。

(2) 日本

日本においては、防衛産業は、武器輸出三原則により、国内市場（防衛庁）のみが対象となっている。また、防衛関連研究開発費も米国の 1/50 程度と、決して潤沢ではない。一方で、防衛装備品に対する要求性能は近年増々高まっており、これに対応して、装備のハイテク化、電子装備品及びソフトウェアのウェイトの上昇という現象が見られる。

このような背景を踏まえ、平成 12 年 11 月に防衛産業・技術基盤研究会から発表された、「防衛産業・技術基盤の維持・育成に関する基本的方向—21 世紀における基盤の構築に向けて—」において、技術基盤の強化という視点で、以下を提言している。

①技術基盤の維持・育成

- ・ 重点技術分野の明確化が必要不可欠。例えば、各種センサー及びデータ処理技術、材料関連技術といった要素技術や主要装備品のシステムインテグレーション技術など。
- ・ 今後、防衛技術の基盤強化を図る際には、IT 分野を中心に、防衛技術と民生技術との間に広範な相乗効果があることを踏まえ、民生技術への波及効果や汎用性等が期待できる最先端技術を重視することが必要（航空機等の大型システムは、技術の波及効果も非常に広範で大きく、例えば機械、エレクトロニクス、宇宙分野等の広範な各分野の技術レベルを全体的に底上げすることが期待できる）。

②効率的・効果的な研究開発の推進

- ・ 技術の人員の増加と欧米諸国に比べて低水準にある我が国の研究開発予算を増額することが基本であるが、それに加え、1)研究開発における計画性の確保、2)技術実証型研究の推進、が必要。

③評価体制を含む研究開発に関する体制及び実施の在り方の見直し

- ・ 我が国においては、三自衛隊は軽微なものを除き自ら研究開発を実施せず、技術が三自

衛隊の要求を受けて一元的に防衛庁の研究開発を実施してきた。近年の環境変化に対応するためには、技術制度を基本的には維持しつつ、1)研究開発プロジェクトの期間の短縮化への配慮（研究開発プロジェクトの期間の短縮化と弾力的な研究開発の推進）、2)研究開発における評価体制の見直し（中間評価の実施など）、3)官民・官官協力の推進、任期付き任用制度の活用、特許権の民間企業への付与（官民間及び官官間での研究課題の分担、技術者の交流、研究経費の分担、研究施設の利用、任期付き任用制度の活用による、民間の研究者の採用

④ 装備・技術面での日米協力の強化

- ・日米共同研究開発等装備・技術面での日米協力の強化については、我が国固有の制約条件に十分配慮しつつ、官民双方において互恵的な関係を質量ともに拡充させていくことを基本方針とすべき。
- ・その上で、今後は、共同開発の前提となる要求性能の設定と各国の防衛構想等の自主性をどのように調和させるのか、米側の優れた技術にアクセスするためのバーゲニングパワーとして米側にも魅力のある要素技術を我が国としてどのように維持・育成していくのか、研究開発成果の共有等できるだけ対等な立場での参加をどのように確保するか、などの点に留意しつつ、新たな共同研究開発の可能性を探っていくことが必要。

⑤ 重点技術分野の明確化等

- ・重点技術分野の明確化と重点的な資源配分が、基盤の効率的・効果的な維持・育成の観点から必要不可欠。
- ・今後は、国内外の技術動向を踏まえた上、重点化される防衛技術分野や今後の研究開発に関する評価及び実施の在り方を含む研究開発のガイドラインを策定するとともに、上記の基本的な方針についても必要に応じ見直しを行うことが重要。その際の視点は1) ITなどの技術革新が主要装備の各分野に横断的に及ぶ傾向があることを踏まえた、分野横断的な視点、2)我が国固有のものを含む防衛ニーズ、民生技術の得意分野、ライセンス国産における非開示情報や部品輸入の増大傾向などを踏まえた、防衛技術基盤の効率的・効果的な維持の視点、3)我が国全体の技術への波及効果の視点

また、図1. 12に示すような防衛技術と民生技術の関係に関する図を提示している。

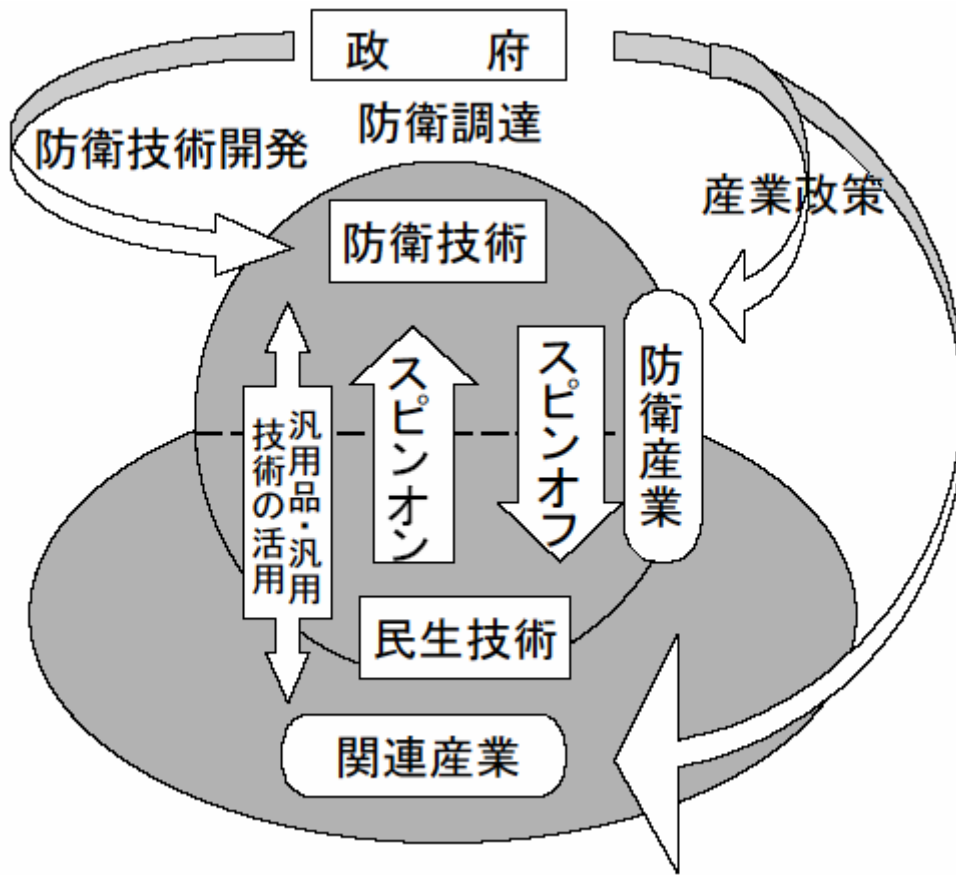


図1. 12 防衛技術と民生技術の関係

(出典：防衛産業・技術基盤の維持・育成に関する基本的方向—21世紀における基盤の構築に向けて—(平成12年11月防衛産業・技術基盤研究会))

従来皆無に近かった大学などとの連携、官民間及び官官間での研究課題の分担、技術者の交流、研究経費の分担、研究施設の利用など、協力のあり方の見直しを行うことが必要であること、民間企業が防衛庁から委託された研究開発で得られた技術の民生転用を容易にすること、などが主張されている。

1. 4 我が国防衛装備の高度化のための課題

素材技術のように、最もシビアなニーズが防衛分野にある技術については、コストを重視する民生用品からのスピノンの研究開発が進めにくく、米国 DARPA のように、自らの戦略で研究開発を行うことが有効であるが、これには、膨大な研究開発費が必要である。防衛関連 R&D 費が少ない日本ではこのような研究開発を防衛の枠内で行うことは事実上不可能である。素材分野などのように、スピノンの研究開発を行えるような仕組みの構築が必要である。

最近では変化の兆しが見えつつあるが、我が国では防衛装備の高度化のための研究開発、特にデュアルユース技術の研究開発については、もっぱらスピノンの研究開発方策が用いられている。これは、特に IT 関連で顕著である。

スピノンの研究開発は、民生品のニーズが防衛品のニーズと同程度のシビアさである場合や民生品の市場が十分に大きい場合には、費用と時間の節約という意味できわめて有効である。

一方で、素材技術のように、最もシビアなニーズが防衛分野にある技術については、コストを重視する民生用品からのスピノンの研究開発が進めにくい。このような技術の場合、米国 DARPA のように、自らの戦略で研究開発を行うことが有効であるが、これには、膨大な研究開発費が必要である。防衛関連 R&D 費が少ない日本ではこのような研究開発を防衛の枠内で行うことは事実上不可能である。素材分野などのように、スピノンの研究開発を行えるような仕組みの構築が必要である。

1. 5 府省連携によるプログラムデュアルユース技術開発の提案

素材技術はナノテクノロジーの進展に伴い、大きな発展を遂げようとしている。米国においては、高コストであっても製品性能本位で実用化が可能な防衛分野をターゲットとすることで、実用化のハードルを下げるができる上、DARPA などの豊富な研究開発資金を活用できることから、企業にとって、最先端の技術開発を行ないやすい環境にある。

我が国においては、このような制度を踏襲することはできないが、性能本位的側面の強い防衛分野を初期市場とみなすことができれば、最先端技術の実用化が加速することは明らかである。

このような背景を踏まえ、府省連携によるプログラムデュアルユース技術開発制度を提案する。具体的には、以下の流れを想定する。

- ①デュアルユース可能な技術の設定
- ②経済産業省による初期市場向け研究開発
- ③防衛庁による防衛向けスピノン研究開発
- ④プログラムデュアルユースの波及—スパイラルアップ型市場拡大

このような制度を創出することにより、防衛庁、経済産業省、開発者（大学・企業）の3機関はそれぞれメリットを享受することが可能となると期待される。

但し、1)情報、IT など、既に民生品の性能が防衛用途を凌駕しているもの、2)既に市場が拡大期に入っており、初期市場としての防衛市場の役割があまり期待できないもの、3)デュアルユースを標榜することで、武器輸出三原則などに抵触し、輸出が困難になるもの、などについてはこのような研究開発制度によるマイナスの影響が懸念される。

素材技術はナノテクノロジーの進展に伴い、大きな発展を遂げようとしている。基礎研究レベルではわが国の素材レベルは世界的に見ても高度なレベルにある。しかしながら、基礎研究や応用研究から実用化への道筋は、必ずしも順調であるとはいえない。その理由の一つとして、応用研究レベルで高性能の素材シーズがあったとしても、コスト的問題で実用化に踏み切れない場合があると思われる。

米国においては、DARPA などで行なわれている研究開発により、この問題を回避している。高コストであっても製品性能本位で実用化が可能な防衛分野をターゲットとすることで、実用化のハードルを下げるができる上、DARPA などの豊富な研究開発資金を

活用できることから、企業にとって、最先端の技術開発を行ないやすい環境にある。

我が国においては、このような制度を踏襲することはできないが、性能本位的側面の強い防衛分野を初期市場とみなすことができれば、最先端技術の実用化が加速することは明らかである。

このような背景を踏まえ、府省連携によるプログラムデュアルユース技術開発制度を提案する。図1. 13に概要を示す。

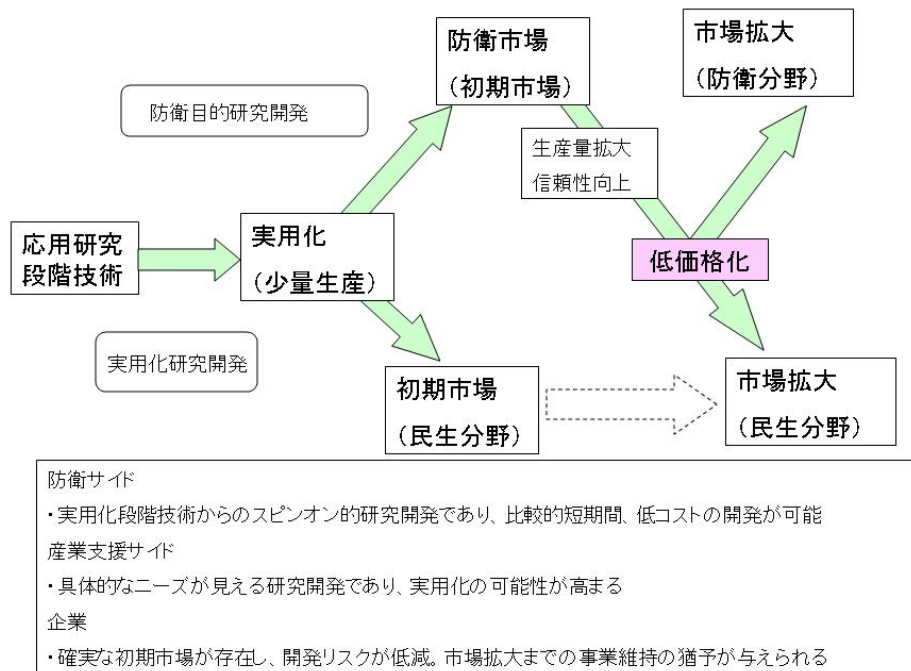


図1. 13 府省連携によるプログラムデュアルユース技術開発の概要

具体的には、以下のような流れを想定している。

1) デュアルユース可能な技術の設定

防衛技術として必要、かつ、将来的な民生波及が十分に期待できる技術であり、現時点では萌芽的段階である技術を対象とする。この際、民生用途としての初期市場（規模は小さいが、ある程度高価であってもかまわない領域：趣味・嗜好関連）についても明確化する。この設定と目標仕様の設定段階から防衛庁と経済産業省が連携する必要がある。

2) 経済産業省による初期市場向け研究開発

経済産業省が、主として民生初期市場をターゲットに、萌芽技術を産業技術に移行するための実用化研究開発を行う。開発成果は、民生用初期市場を対象に事業化する。

3) 防衛庁による防衛向けスピノン研究開発

防衛庁では、経済産業省の研究開発成果（初期市場）を基に、防衛目的のスピノン研究を行う。開発成果を防衛市場に展開することで、初期市場がある程度の規模になる。

4) プログラムドデュアルユースの波及ースパイラルアップ型市場拡大

防衛市場と初期民生市場を合わせることで、市場が拡大し、生産技術が向上する。これにより単価が下がり、防衛市場と初期民生市場の双方の裾野が広がる。次第に市場が拡大することにより、価格が低下し、更なる市場拡大が生じる。

このような市場拡大がある段階（価格）になった段階で民生用途としての適用範囲が急速に拡大し、市場が急拡大するといった好循環が期待される。

このような制度を創出することにより、防衛庁、経済産業省、開発者（大学・企業）の3機関はそれぞれ表1. 2に示すようなメリットを享受することが可能となると期待される。

表1. 2 府省連携によるプログラムドデュアルユース制度のメリット

機関	メリット
防衛庁	<ul style="list-style-type: none">膨大な研究開発費用が必要な先端開発を、最後のスピノン部分だけの投資で実施できる素材、部材といった日本の技術力を活かせる分野について、最先端の技術を入手できる。国産先端技術を保有することで、米国との共同開発などでもある程度イニシアティブをとることができる
経済産業省	<ul style="list-style-type: none">初期市場の一つとして防衛分野を期待することができ、実用化研究開発投資の成功確率の向上を期待できる民生用だけでは展開できない先端材料開発などを推進でき、長期的な産業競争力維持に役立つ
開発者（大学・企業）	<ul style="list-style-type: none">研究開発費用に関する支援を受けることができ、開発リスクが低減する民生用としては短期的な市場が見えにくい最先端研究開発にチャレンジできる研究開発成功時には、初期市場として確実な分野を期待でき、市場化のリスクを低減することができる

但し、1)情報、IT など、既に民生品の性能が防衛用途を凌駕しているもの、2)既に市場が拡大期に入っており、初期市場としての防衛市場の役割があまり期待できないもの、3)デュアルユースを標榜することで、武器輸出三原則などに抵触し、輸出が困難になるもの、などについてはこのような研究開発制度によるマイナスの影響が懸念される。

2. 防衛分野と民生分野の両方で使用可能なナノ技術領域の抽出

2. 1 米国 DoD のナノテクノロジー関連研究開発戦略

DoD は政策志向の機関であるため、そのナノテクノロジープログラムは、科学技術的価値に加え DoD との潜在的関連性に焦点を当てているという点で、他の連邦機関のものとは異なる。

DoD プログラムのゴール（長期的課題）は以下の通りである。

- ・ 戦闘機や戦闘システムの将来性を大きく躍進させるような新たな現象やプロセスを開発すること
- ・ 個々のナノ構造を融合、特徴づけ、集積についての活発な戦略を発展させること
- ・ 画期的な触媒、スカベンジャー、タグ材料、センサーについて、ナノ構造のアプリケーションを開発すること
- ・ 高性能な熱電、熱イオン学、光電池のデバイス開発に関係した個々のナノワイヤ、2、3 次元のナノストラクチャでのフォトンや電子の輸送の基礎的な側面を明らかにすること

DoD は政策志向の機関であるため、そのナノテクノロジープログラムは、科学技術的価値に加え、DoD との潜在的関連性に焦点を当てているという点で、他の連邦機関のものとは異なる。DoD ナノテクプログラムの全体的な技術目標は、約 1～100 nm の次元の現象の理解やコントロールを促進することにある（物理的、化学的、生物学的特性が、個々の原子、分子、あるいはバルクとは根本的に異なりうる）。

DoD に関連した全体的な目標は、ナノの次元で、戦闘機や戦闘システムの将来性を高められるような新たなアプリケーションでユニークな事象を開発することにある。

DoD プログラムのゴール（長期的課題）

- ・ 戦闘機や戦闘システムの将来性を大きく躍進させるような新たな現象やプロセスを開発すること
- ・ 個々のナノ構造を融合、特徴づけ、集積についての活発な戦略を発展させること
- ・ 画期的な触媒、スカベンジャー、タグ材料、センサーについて、ナノ構造のアプリケーションを開発すること
- ・ 高性能な熱電、熱イオン学、光電池のデバイス開発に関係した個々のナノワイヤ、2、3 次元のナノストラクチャでのフォトンや電子の輸送の基礎的な側面を明らかにすること

にすること

DoD プログラムの目標 (ナノマテリアル)

- ・ ナノ構造を利用しながら、デバイスの量子輸送特性のプロセスをコントロールするのに要求される精密なナノ構造を合成する技術を発達させること
- ・ 低コストでの合成のため生物学的なプロセスを活用し、所定のナノ構造の型を作ること
- ・ 合成物質と自然発生的な（生物学的な）物質の相互作用をコントロールし、利用すること
- ・ 局所的な拡散、反応カインेटックス、光学物性、電子物性を改善するために、ナノの構造を発達させること

DoD プログラムの目標 (ナノスケールのデバイスやシステム)

- ・ 新たなものの開発、既存のデバイスやシステムの改良のために、ナノスケールの科学技術の法則を適用すること。パフォーマンスや新たな機能性の改良を達成するために、ナノスケールもしくはナノ構造の物質を合体させること（システムやデバイスそれ自体はこのサイズに限られない）。
- ・ 戦闘機や戦闘システムの性能を促進させるため、ナノテク分野での革命的なデバイスやシステムを提供するような新発見を利用すること
- ・ 電気化学的な電源のアプリケーション（**discharge rate** やエネルギー密度の高まったバッテリー、高エネルギー密度のキャパシタ）、燃料電池、電極構造に関連した、詳細なナノスケールの理解を構築すること構築すること
- ・ 科学的な発見から DoD に関連した技術への移行を促進させるため、
- ・ 将来の討論の機会や必要条件を検証するため、DDR&E、AGED、CARTECH、SUBTECH、SURFTECH、RDECOM と協働すること

DoD プログラムの目標 (機械工学研究、度量衡学、ナノテクノロジーの標準)

- ・ 評価、計測、合成、物質・構造・デバイス・システムのデザインのための次世代のインスツルメンテーションを含めたナノテクノロジーの研究やコマースライゼーションを促進させるため必要とされるツールを発達させること。
- ・ 用語法、材料、評価、検査、生産の標準を含めた標準の開発。
- ・ 発達段階にある高度のナノテクノロジーベースの材料やデバイスのための、新たな次世代機器を発展させること

- ・磁力顕微鏡を発達させ、強力な単スピン計測デバイスを可能にすること
- ・新たな計測の性能を防衛任務に使用される新たなセンサーに拡大すること

DoD プログラムの目標（ナノマニュファクチャリング）

- ・スケールアップした、信頼性があり、かつ効率的なナノスケールの材料、構造、デバイス、システムの生産を可能にすること。超小型化されたトップダウンプロセスと、複雑なボトムアップまたは自己集積プロセスの発展と統合。
- ・ナノテクノロジーの軍事武器への導入をガイド・監視すること
- ・ナノマニュファクチャリングの SBIR、STTR、MANTECH への適切な導入の機会を認定すること
- ・ナノワイヤや特に重要な無機物質の配列の型としての関連する構造の利用など、生物学からの引用を利用した個々のナノ構造の合成、生成、集合を可能にすること
- ・ナノ構造のバルクに適合したマニュファクチャリングアプローチを発達させること

DoD プログラムの目標（主要な研究機関や機械の導入）

- ・研究機関の設立、主要な機械の導入、ナノスケールサイエンスの運営、工学、技術の研究や発展等、国の科学的インフラストラクチャの発展、支援、増進させるその他の活動。継続中の主要な機関やネットワークの運営。
- ・DURIP を通じた高度なナノサイエンス機器の供給
- ・ナノサイエンス研究に寄与できる機関や器具を DoD に設置すること

DoD プログラムの目標（社会的側面）

- ・ナノテクノロジー（人間、動物、もしくは処理されたナノスケールの物質、ナノ構造の物質、ナノテクノロジーベースのデバイスやその副産物にさらされたこと、によって起こるものを含む）によって起こる健康や環境への潜在的リスクの特定・緩和。学校、大学学部課程、技術訓練、公共機関向けの適切なナノマテリアルの開発。
- ・将来ナノテクノロジーベースのアプリケーションを使う兵士の健康や安全を保証すること
- ・水、空気、空間の物理化学的な評価や中毒防止を可能にすること
- ・将来の防衛のニーズに必要とされる技術労働者を奨励できる学際教育システムへの投資戦略を維持すること
- ・ナノテクノロジーの防衛利用から生じる環境や健康に有害な影響の評価、回避、緩和

2. 2 米国 DARPA におけるデュアルユース研究

DARPA の研究開発が参考となる。以下、幾つかの例（プレスリリースがあった例）を紹介する。

- ①業界で最も低電圧の 65nm SRAM の試作品
- ②クリーンエネルギーの実用化開発
- ③Bio-Magnetic Interfacing Concepts
- ④分子エレクトロニクス技術開発
- ⑤生物分子モーター
- ⑥生体光学合成システム
- ⑦工学的な生体分子ナノデバイス／システムの開発
- ⑧量子情報科学技術の開発
- ⑨先進ファイバー
- ⑩チップスケールの原子時計
- ⑪バイオエージェント検出のための III-窒化物 UV 光学デバイス
- ⑫ナノ-UAV チャレンジ

これらの研究開発を見ても分かるように、DARPA では、かなり先端的なテーマの実証に積極的に資金を提供している。内容的にも、最終的な国防応用を謳っているものの、何らかの形で産業応用に繋がるものが殆どであるといえる。

デュアルユースを考える場合、DARPA の研究開発が参考となる。表 2. 1 に、現在、それぞれのオフィスで推進中の DARPA の R&D プログラムを示す。防衛、と銘打っているが、プログラム名だけを見ても、多くのプログラムの成果は民生転用が可能であると思われる。

表2. 1 DARPAにおいて推進中のR&Dプログラム(2005年現在) (1/7)

オフィス	プログラム名称
ATO プログラム(40件)	Acoustic Arrays For Torpedo Defense (Electric Curtain) Air Cavity Drag Reduction (AIRCAT) Aluminum Combustor Carrier Manpower Reduction Study Center of Excellence for Research in Oceanographic Sciences (CEROS) Command Post of the Future (CPOF) Connectionless Networks Control-Based Mobile Ad-Hoc Networking (CBMANET) Control Plane DARPA Interference Multiple Access (DIMA) Defense Against Cyber Attacks on Mobile Ad Hoc Network Systems Disruption Tolerant Networks Dynamic Optical Tags (DOTS) Dynamic Quarantine of Computer-Based Worm Attacks (DQW) FCS Communications HEDLight High Precision Laser Designator (HPLD) Hostile Fire Indicator Integrated Battle Command Marine Airborne Re-Transmission System (MARTS) Mobile Network MIMO (MNM) Networking in Extreme Environments (NETEX) NeXt-Generation Communications (XG) Non-Linear Dynamics Optically Designated Attack Munitions (ODAM) ORCLE Persistent Ocean Surveillance Polarized Rotation Modulation (PRZM) Radio Isotope Micropower Sources (RIMS) Rescue Transponder Retro-Directive Ultra-Fast Acquisition Sensor (RUFAS) RF Guided Munitions SandBlaster Sticky Flares TANGO BRAVO Surface Wave Energy Harvesting Sustained Littoral Presence Synthetic Aperture Ladar for Tactical Imaging (SALTI) Very High Efficient Solar Cells (VHESC) Wolfpack

表2. 1 DARPAにおいて推進中のR&Dプログラム(2005年現在) (2/7)

オフィス	プログラム名称
DSO プログラム(74件)	<p>Advanced Armor Advanced Fiber Applications of Molecular Electronics Bio-Magnetic Interfacing Concepts Biologically Inspired Multifunctional Dynamic Robotics Biological Sensory Structure Emulation Bio-Molecular Motors Bio-Optic Synthetic Systems Compact Hybrid Actuators DARPA Initiative in Titanium Direct Thermal to Electric Conversion Discovery and Exploitation of Structure in Algorithms Engineered Bio-Molecular Nano-Devices/Systems Evaporative Cooling Turbine Blades Exoskeletons for Human Performance Augmentation Femtosecond Adaptive Spectroscopy Techniques for Remote Agent Detection Focus Areas in Theoretical Mathematics Friction Stir Processing Fundamental Laws of Biology Geospatial Representation and Analysis Guided BEC Interferometry High-Performance, Corrosion-Resistant Materials Human-Assisted Neural Devices Improving Warfighter Information Intake Under Stress (AugCog) Sensing and Processing Intelligent Multi-modal Volume Angio Computed Tomography Intestinal Fortitude Jet Blast Deflector Long-Term Storage of Blood Products LSTAT-liteMathematical Time Reversal MetaMaterials Mobile Integrated Sustainable Energy Recovery Morphing Aircraft Structures Nastic Materials Negative Index Materials Neovision Neurology for Intelligence Analysts Palm Power Pathogen Countermeasures Peak Soldier Performance Precision Inertial Navigation Systems Predicting Real Optimized Materials Preventing Sleep Deprivation Prognosis Protein Design Processes Quantum Information Science and Technology Rapid Mission Rehearsal Rapid Vaccine Assessment Restorative Injury Repair</p>

表2. 1 DARPAにおいて推進中のR&Dプログラム(2005年現在) (3/7)

オフィス	プログラム名称
DSO プログラム(74件)	Revolutionizing Prosthetics Robust Uncertainty Management Self Decontaminating Surfaces Simulation of Bio-Molecular Microsystems Slowing, Storing and Processing Light Small Uninhabited Air Vehicle Engine Soldier Self Care Sonofusion SPins IN Semiconductors (SPINS) Stealthy Sensors Steam Engine Electric Generator Stochastic and Perturbation Methods in PDE Systems Structural Amorphous Metals Superconducting Hybrid Power Electronics Surviving Blood Loss Synthetic Multifunctional Materials The Virtual Soldier Topological Data Analysis Training Superiority (DARWARS) Trauma Pod Ultra-broadband Optical Arbitrary Waveform Generation WASP Water Harvesting Waveforms for Active Sensing X-ray Navigation and Autonomous Position Verification
IPTO プログラム(19件)	Architectures for Cognitive Information Processing (ACIP) Personalized Assistant that Learns (PAL) Advanced Soldier Sensor Information System and Technology (ASSIST) Polymorphous Computing Architectures (PCA) Biologically-Inspired Cognitive Architectures (BICA) Power Aware Computing and Communication (PAC/C) Compact Aids for Speech Translation (CAST) Quantum Information Science and Technology (QuIST) Coordination Decision Support Assistants (Coordinators) Real-World Reasoning (REAL) Global Autonomous Language Exploitation (GALE) Self-Regenerative Systems (SRS) High Productivity Computing Systems (HPCS) Translingual Information Detection, Extraction and Summarization (TIDES) Information Theory for Mobile Ad-Hoc Networks (ITMANET) Taskable Agent Software Kit (TASK) Learning Applied to Ground Robots (LAGR) Situation Aware Protocols in Edge Network Technologies (SAPIENT) OASIS Integration, Demonstration and Validation (OASIS DEM/VAL)

表 2. 1 DARPA において推進中の R&D プログラム(2005 年現在) (4/7)

オフィス	プログラム名称
IXO プログラム(30 件)	Adaptive and Reflective Middleware Systems (ARMS) Affordable Adaptive Conformal ESA Radar (AACER) Camouflaged Long Endurance Nano Sensors (CLENS) Close Combat Lethal Recon (CCLR) DARPA Agent Mark Up Language (DAML) Dynamic Tactical Targeting Testing (DTT) Exploitation of 3-D Data (E3D) Fast Connectivity for Coalition Agents Program (Fast C2AP) FOPEN Reconnaissance, Surveillance, Tracking and Engagement Radar (FORESTER) Heterogeneous Urban RSTA Team (HURT) Jigsaw Joint Air/Ground operations: Unified Adaptive Replanning (JAGUAR) Multicell and Dismounted Command and Control (M&D C2) Multispectral Adaptive Networked Tactical Imaging System (MANTIS) National Tactical Exploitation to Counter Enemy Air Defenses (NTEX) NetTrack Networked Embedded Systems Technology (NEST) Persistent Surveillance Program (POSSE) Predictive Analysis for Naval Deployment Activities (PANDA) Program Composition for Embedded Systems (PCES) Quint Networking Technology (QNT) Real-Time Adversarial Intelligence & Decision Making (RAID) Sensing and Patrolling Enablers Yielding Enhanced SASO (SPEYES) Software Enabled Control (SEC) Standoff Precision ID in 3-D (SPI-3D) Tactical Targeting Network Technology (TTNT) Ultralog (Ultralog) Urban Scape Video Verification of Identity (VIVID) Wide-Area All-Terrain Change Indication Technologies (WATCH-IT)
MTO プログラム(60 件)	3-D MERFS: 3-D Micro Electromagnetic Radio Frequency Systems 3-D IC: 3D Intergrated Circuits AFPA: Adaptive Focal Plane Array APPLE: Adaptive Photonic Phase-Locked Elements ADRT: Advanced Digital Receiver Technology ALP: Advanced Lithography AMTP: Advanced Microsystems Technology Program APROPOS: Advanced Precision Optical Oscillators AOSP: Analog Optical Signal Processing A-to-I: Analog to Information ABCS: Antimonide Based Compound Semiconductors ADHELDS: Architecture for Diode High Energy Laser Systems CHEMS: Chemical Engineering Molecular Scale CSAC: Chip-Scale Atomic Clock CS-WDM: Chip-Scale Wavelength Division Multiplexing C2OI: Chip-to-Chip Optical Interconnects CLASS: Clockless Logic CAD-QT: Cognitively Augmented Design for Quantum Technology DOD-N: Data in Optical Domain - Network EPIC: Electronic & Photonic Integrated Circuits

表 2. 1 DARPA において推進中の R&D プログラム(2005 年現在) (5/7)

オフィス	プログラム名称
MTO プログラム(60 件)	ECHIPPS: Embedded Configurable High Performance Processing of Signals ESE: Energy Starved Electronics FCRP: Focus Center Research Program HERMIT: Harsh Environment Robust Micromechanical Technology HOTMWIR: High Operating Temperature Mid-Wave Infrared IRFFE: Intelligent RF Front-Ends L-PAS: Laser Photoacoustic Spectroscopy PHOR-FRONT: Linear Photonic RF Front-End Technology LEAPS: Liquid Electronics Advanced Power Sources MX: MEMS Exchange MCC: Micro Cryogenic Coolers MGA: Micro Gas Analyzers MPG: Micro Power Generation MEP: Micro-Electric Propulsion MIATA: Microantenna Arrays: Technology and Applications MONTAGE: Multiple Optical Non-redundant Aperture Generalized Sensors NGIMG: Navigation Grade Integrated micro Gyroscopes NLMMSM: Non-Linear Mathematics for Mixed Signal Microsystems O-CDMA: Optical Code Division Multiple Access PCAR: Photon Counting Arrays PTAP: Photonics Technology Access Project RF MEMS: RF MicroElectroMechanical Systems RADHARD: Radiation Hardening by Design RIMS: Radio Isotope Micro Power Sources RIPE: Robust Integrated Power Electronics SMART: Scalable Millimeter-Wave Architectures for Reconfigurable Transceivers SUVOS: Semiconductor Ultraviolet Optical Sources STAP-BOY: Space Time Adaptive Processing SWIFT: Sub-Millimeter Wave Imaging Focal-Plane Technology SHEDS: Super High Efficiency Diode Sources MORPH: Supermolecular Photonics Engineering TACOTA: Technology for Agile Coherent Transmission Architecture TEAM: Technology for Efficient Agile Mixed-Signal Microsystems TFAST: Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters TIFT: Terahertz Imaging Focal-plane Technology ULTRA-TR: Ultra-Wideband Multifunction Photonic Transmit/Receive Module UPR: University Photonics-Based Research Centers VISA: Vertically Interconnected Sensor Arrays WBG-RF: Wide Bandgap Semiconductor Technology Thrust I - RF/Microwave/Millimeter-wave Technology WBG-HPE: Wide Bandgap Semiconductor Technology Thrust II - High Power Electronics

表2. 1 DARPAにおいて推進中のR&Dプログラム(2005年現在) (6/7)

オフィス	プログラム名称	
SPO プログラム(27件)	Space(3件)	Innovative Space-Based Radar Antenna Technology Navigation via Signals of Opportunity (NAVSOPP) Novel Satellite Communications
	Defense Against Chemical, Biological & Radiological Weapons (8件)	Advanced Portal Security (APS) Building Protection Toolkit (BPTK) Handheld Isothermal Silver Standard Sensor (HISSS) Immune Building (IB) Sensors for Immune Buildings (SIB) Spectral Sensing of Bio-Aerosols (SSBA) Threat Agent Cloud Tactical Intercept & Countermeasure (TACTIC) Triangulation Identification for Genetic Evaluation of Risks (TIGER)
	Urban Operations (6件)	Close Quarters Explosive (CQE) Deep Bleeder Acoustic Coagulation (DBAC) Integrated Sensor in Structure (ISIS) Low-Altitude Airborne Sensor System (LAASS) Reversible Barriers (ReBar) Polymer Snow
	Defeat of Underground Facilities (2件)	Low-Altitude Airborne Sensor System (LAASS) Passive, Acoustic, Seismic and Electromagnetic Monitoring (PASEM)
	Tactical Missile Defense (2件)	Low Cost Cruise Missile Defense (LCCMD) Multifunction Electro-Optics for Defense of US Aircraft (MEDUSA)
	Tailored Tactical Surveillance (4件)	Innovative Space-Based Radar Antenna Technology (ISAT) Integrated Sensor in Structure (ISIS) Knowledge Aided Sensor Signal Processing and Expert Reasoning (KASSPER) Low-Altitude Airborne Sensor System (LAASS)
	GPS - Free Navigation (2件)	Global Positioning Experiments (GPX) Navigation via Signals of Opportunity (NAVSOPP)
	TTO プログラム(32件)	Unmanned Systems (8件)
Space Systems (7件)		Deep View Falcon High Frequency Active Auroral Research Project (HAARP) Orbital Express Space Operations Architecture Space Assembly and Manufacture Space Surveillance Telescope (SST) Spacecraft for the Universal Modification of Orbits (SUMO)
Urban Operations (3件)		Boomerang Crosshairs Micro Air Vehicle (MAV) Advanced Concept Technology Demonstration (ACTD)

表2. 1 DARPAにおいて推進中のR&Dプログラム(2005年現在) (7/7)

オフィス	プログラム名称	
TTO プログラム(32件)	Tactical Multipliers (14件)	Laser Compact Lasers for Coherent Communications, Imaging and Targeting (CCIT) Compact Military Engines Heavy Fuel Engine for A160 High Energy Liquid Laser Area Defense System (HELLADS) High Power Fiber Lasers (HPFL) Hypersonic Flight Demonstration (HyFly) MAGneto Hydrodynamic Explosive Munition (MAHEM) Micro Adaptive Flow Control (MAFC) Mission Specific Processing (MSP) Multi Dimensional Mobility Robot (MDMR) Reconnaissance, Surveillance and Targeting Vehicle (RST-V) Small Scale Propulsion Systems (SSPS) Ultra Wideband Array Antennas (UWBAA) Walrus

以下、幾つかの例（プレスリリースがあった例）を紹介する。

①業界で最も低電圧の65nm SRAM の試作品

ISSCC（国際固体素子回路会議）において、マサチューセッツ工科大学（MIT）の研究者が、テキサスインスツルメンツ（TI）の最新の65nmCMOSプロセスによって製造された超低消費電力（ULP）256kbitSRAMの試作品を発表した。これは、高性能と低消費電力の両立が不可欠なバッテリー駆動デバイス用に開発されたSRAMで、業界で最も低電圧で動作する。また同SRAMは、モバイル製品のバッテリー寿命を延長するTIの『SmartReflex™』電源管理技術を応用している。

試作されたSRAMは0.4Vというサブ・スレッシユホールド領域で動作し、従来の0.6Vの閾値電圧をもつ6トランジスタのSRAMと比較して漏れ電力が1/2.25に削減（約56%削減）されている。この256kbitSRAMは、TIの65nmプロセスによってパターン密度を大きくし、ビットセルあたり10個のトランジスタを組み込み、動作電圧を400mVまで低下させることに成功した。

この研究開発には、DARPAの他TIも研究開発費を支出している。

②クリーンエネルギーの実用化開発

デラウェア大学(UD)が推進する高効率太陽電池研究（Very High Efficiency Solar Cell : VHESC）コンソーシアムは、2005年11月2日に、50カ月以内に太陽電池の効率を2倍以上にするプログラムに、5300万ドルを受けることを明らかにした。この資金の大

半は DARPA(国防高等研究計画局)が拠出する。このコンソーシアムには、大学、企業、国立研究所など 15 機関が参加する。すべての計画が認められると、DARPA から 3360 万ドル、デラウェア大学および企業チームメンバーから 1930 万ドルが拠出されることになる。企業メンバーとして、デュポン、BP Solar、コーニング、LightSpin Technologies、および Blue Square Energy の名前が挙がっている。

現在、最高品質の太陽電池のピーク効率は 24.7%、製造ラインの太陽電池では 15-20% である。研究チームの性能目標は実験室レベルで 54%、製造レベルで 50%と、大幅な性能向上を予定している。DARPA は、少なくとも太陽エネルギー変換効率 50%で作動し、しかも、手ごろな価格で試作品を 1000 セット開発、生産することを要求している。

③Bio-Magnetic Interfacing Concepts

DARPA の生体磁気調整構想(BioMagnetICs)プログラムは、細胞や単分子レベルでの生体活動をモニタリング、制御するためのポータブルで硬く高性能伝達メカニズムとして、ナノスケール磁気の利用性を探求し、実施するものである。

生細胞と組織は、高選択的な生化学センシング、蛋白質合成、情報処理、色変化を含む並はずれた機能性を示す。

BioMagnetICs プログラムでは、頑丈で、磁気ベースの生体分子シグナル伝達メカニズムの立証を容易にするいくつかの中核技術の開発と立証に焦点を置いている。これらの技術は、(1)高度の特異性をもつ単生体分子や細胞に接着することができる優れた磁気特性を持った、斬新で生体適合性がある磁性流体または磁気タグ、(2)100nm かそれ以下の直径を持つ単磁性ナノ粒子を検出することができる生体適合性があり、高感度の磁気センサー、そして(3)生体適合性があり、単磁性ナノ粒子を操作できる高密度な磁気ピンセットが、ナノスケール精度で生体分子に取り付けられた構造の開発などを含んでおり、例えば、多成分分析・高速・高感度・微量機能を持った頑丈でポータブルな生体探知装置、ポータブルで磁気ベースのマイクロトータル分析システム(micro-TAS)、健康な細胞や組織の周りに影響を与える有害な副作用なしで、感染した細胞や組織を攻撃するための斬新で、磁性的に対象とされた治療アポトーシス技術、有糸分裂、タンパク質表現、及び色変化のような細胞内機能を開始して、モニターするための新しい手法などの実用化に有用であると期待されている。

④分子エレクトロニクス技術開発

DARPA の分子エレクトロニクス(MoleApps)プログラムは、長期的な分子コンピューター

イングおよび分子センシングシステムに寄与することを目的にしている。

分子コンピューティング：MoleAppsでは、プログラムできるナノプロセッサシステムを開発する。このコンピュータシステムは、 $100\ \mu\text{m}^2$ の総面積であり、オリジナルのインテル 4004 マイクロプロセッサに匹敵する論理や演算能力を有する他、室温で作動する。

これは、インテル 4004 プロセッサの 10 万分の 1 の面積であり、現在産業界で用いられているシステムの 100 倍の密度に相当する。

分子センシング：MoleAppsセンサーの開発では、 $100\ \mu\text{m}^2$ の総面積を占め、現在の最先端の検出器に匹敵する感度や選択性を持つ化学的、生物学的な物質を検出するナノセンサーシステムを開発する。この目的を達成するため、1000 の個々のナノセンサーは、 $1\ \mu\text{m}^2$ を占める高密度アレイに実装される。

⑤生物分子モーター

生体分子モーターは、化学的エネルギーを機械的な仕事に変換する自然のナノマシンであり、効率、サイズともに人工物をはるかに凌駕する。このプログラムの主な目的は、生体分子モーターの基本的な操作原理を理解し、ナノからマクロスケールまで役立つデバイスへこの知識を利用することである。単一あるいは複数のバイオ分子、生体模倣分子モーター集合を探求することで達成されると思われる。

プログラムの推進により、DARPA は、革命的なシステムを手に入れることができるかもしれないと期待している。多くのスケールで材料と流体を効率的に作動させるハイブリッドな生物的/機械的な新世代マシンが実現されると期待される。

⑥生体光学合成システム

生体眼総合システムプログラムの目標は、材料化学や階層的な材料構造を通じ、生体模倣コンセプトに基づく人工眼の概念を立証することである。このプログラムでは、特に、中心視を可能にする視点のダイナミックに制御可能な領域、或いはレンズシステムを持っている生体模倣レンズが、設計、製造、検証される。これらのシステムに関する応用例は、コンパクトな分布屈折率レンズなどが考えられる。

⑦工学的な生体分子ナノデバイス/システムの開発

工学的な生体分子ナノ装置/システム(MOLDICE)プログラムでは、バイオ分子のシグナルをリアルタイムに電子信号に直接変換することを可能にする斬新なハイブリッド(生物的-非生物的)ナノスケールインタフェース技術を開発する。このため、生物(例えば、受容体

と筋肉膜タンパク質)のセンシングシステムの理解のため多くの努力が払われている。

このプログラムでは、センシング機能を実現するために生物的ユニット(例えば、プロテインイオンチャネル/ナノポア、G-プロテイン共役受容体など)を使用するが、シグナル処理を実行するためにシリコン回路を使用するハイブリッド生体分子装置/システムを開発する。

⑧量子情報科学技術の開発

QuIST プログラムでは、コミュニケーションとコンピューティングにおける量子力学効果の潜在的に重要な利点を立証するという究極の目標がある。同時に、これらの理論上の進歩で、QuIST は、頑丈な MHz レートの単純な光子ソースや検出器、単一や複数の量子ビットロジックゲートの実践的な実現、量子メモリ、および量子中継器のようなシステムレベルの構造物の開発を含む、安全な量子コミュニケーションと量子計算のための構成要素技術の開発を計画している。また、DARPA の数学的な主眼領域での研究が行われ、量子現象の量子制御や数学的なモデリングを通して、QuIST 内の量子技術の実現や、シグナル処理や他の鍵となる DoD アルゴリズムのための量子計算アプローチの識別と開発の両方へ貢献している。

⑨先進ファイバー

DARPA 先進ファイバープログラムでは、高強度、高靱性の構造カーボンファイバーを開発する。カーボンファイバーは、ロケットエンジンや飛行機の翼などの用途で、米国兵器システム上で実際に使用される。しかしながら、今日のシステムによって使用されるカーボンファイバーは、1980 年代後半に開発され、その技術は本質的には技術的な安定期に達した。DARPA プログラムの目標は、強さと堅さにおいて少なくとも 50%の性能向上を実現するファイバーを開発することである。このためには CNT を適切に添加することが有望であるとの予備的な結果が得られている。

DARPA プログラムでは、カーボンナノチューブを連続したカーボン繊維に組み入れるいくつかの手法を探索し、技術的に確立する予定である。

⑩チップスケールの原子時計

チップスケール原子時計プログラムの目標は、超小型化、低出力の原子時間と頻度参照単位を開発することである。チップスケール原子時計を開発することで、高セキュリティ極超短波通信と故障耐性 GPS 受信機の超小型化(腕時計サイズ)や超低出力時間、振動数標

準などが可能になる。

研究の第1段階は、チップスケール原子時計の理論上の限界を確立し、実用的な設計を示し、製作の実行可能性に焦点を合わせる。第2段階では、超小型化された原子制限セル、GHz ナノ共鳴器、原子共鳴結合共鳴器、およびフェーズロックされたインターフェイス回路の個々の構成要素を立証することに向ける。第3段階では、CMOS回路（Si, Si-Ge, III-Vエレクトロニクス）を伴う操作上のチップスケールの原子時計や統合を立証することに焦点を合わせ、最終的なチップレベル統合も計画されている。

⑪バイオエージェント検出のための III-窒化物 UV 光学デバイス

このプロジェクトでは、斬新な成長や p 型ドーピング法を使用することにより、UV エミッタのための III-窒化物材料とデバイス構造を最適化すること、マイクロ空間エミッタレイやナノフォトニック結晶構造のような UV エミッタの抽出効率を高めるための革新的なアプローチの開発、シングルチップ上の III-窒化物 UV エミッタと UV に感度を持つ検出器を統合するための革新的なアプローチの開発、軍研究所への UV エミッタの提供などを行なう。

また、今までに開発された AlN やデバイス構造物を組み込むことによる 280nm エミッタの最適化と、サブ mW の出力をもつ 280nm のエミッタの開発、UV PC エミッターと UV μ エミッターと検出器の統合を含む、機能的なフォトニック統合デバイスを実現するためのナノ加工技術の開発なども視野に入れている。

⑫ナノ-UAV チャレンジ

DARPA は、洞窟やトンネル内で操作することができる十分に小さい無人航空機を開発して、実証することを計画している。2g のペイロードを含む、10g より小さい軽量の UAV を望んでいる。尚、寸法は 5cm 未満である。この仕様は、現在実地試験されている、マイクロ航空機 (MAV) (重量 200g クラス) よりも 1 桁以上小型である。

これらの研究開発を見ても分かるように、DARPA では、かなり先端的なテーマの実証に積極的に資金を提供している。内容的にも、最終的な国防応用を謳っているものの、何らかの形で産業応用に繋がるものが殆どであるといえる。

2. 3 米国兵士ナノテクノロジー研究所における研究開発

米国陸軍は、それまでの軍内部での検討を踏まえ、2001年2月に Nano Soldier ワークショップを開催した。ここで、将来の兵士としての「目的指向型兵士 (objective force warrior)」なる概念が公表された。ここで提案要請がなされ、MIT の Institute for Soldier Nanotechnology (ISN) 提案が採択され、計9千万ドルで研究開発が行なわれることとなった。ISN では、ISN コンソーシアムを構築し、3つのメンバーシップで企業との共同研究を推進している。これには、ファウンディングメンバーとして DuPont 社、Reytheon 社、Partners Health Care 社が、大企業メンバーとして Dow Corning 社が、小規模事業者メンバーとして Carbon Nanotechnology 社、Dendritic Nanotechnologies 社、Triton Systems 社、Nomatics 社、Zyvex 社が参画している。

また、この他、コンソーシアムのメンバーではないが、年間25000ドルの会費を払って、で W.L. Gore and Associates 社、Honeywell 社、Mine Safety Appliances 社が情報交流を行っている。

なお、ISN では7つのチームが37のプロジェクトを実施している。

チーム1「エネルギー吸収材料」

チーム2「力学的にアクティブな材料・デバイス」

チーム3「センシングおよび中和作用」

チーム4「兵員の医療技術向けバイオマテリアルおよびナノデバイス」

チーム5「製造および分析—ナノファウンドリー」

チーム6「材料およびプロセスのモデリング、シミュレーション」

チーム7「システムズデザイン、硬化、およびインテグレーション」

研究内容を見ると、ISN は、軍のニーズに基づく研究を進めているとはいえ、繊維やソフトアクチュエータの先端シーズの実用化を通じた、産業基盤の確立を意図してものであると見ることができる。

(1) 米国兵士ナノテクノロジー研究所(ISN)設立の経緯

米国陸軍は、それまでの軍内部での検討を踏まえ、2001年2月に Nano Soldier ワークショップを開催した。ここで、将来の兵士としての「目的指向型兵士 (objective force warrior)」なる概念が公表された。図2. 1にコンセプトイメージを示す。



図 2. 1 目的指向型兵士のイメージ

(出典 : Dr. Richard J Paur, Some Thoughts about the Possible Impact of Nanotechnology on Soldier Power (2001))

また、これらの「未来兵士」を実現するために必要な、様々な有望領域についても公表された。表 2. 2 に有望領域例を示す。

表 2. 2 Nano Soldier WS(2001)に基づく有望領域例 (1/3)

領域		概要	ニーズ
材料	高強度、超軽量材料	性能が同等以上で、5~10倍の重量(サイズ、厚み)の減少(材料パフォーマンス向上による革新的デザインパラダイムを含む)	耐衝撃、耐熱・耐火、耐レーザー、EMシールド、切断強度等。輸送機器、シェルター、梱包など。小火器、軍需品。
	適合型、多機能材料	現在の材料システムでは不可能な機能を有する革新的材料、システムオンマテリアル	気配マネージメント(EM、適合型迷彩)。インタラクティブな衣料・布。エネルギー変換、貯蔵。水のリサイクル、個人の廃棄物リサイクル。バイオコンパチビリティ。

表 2. 2 Nano Soldier WS(2001)に基づく有望領域例 (2/3)

領域	概要	ニーズ		
エネルギー・冷却	兵士の 144 時間以上の活動を可能にする革命的 1 次エネルギー源	燃料電池: 簡便かつ安全に輸送できる燃料からの水素製造 バッテリー: ナノ構造電極による 1kW/kg 以上の出力密度のバッテリー、ナノ構造固体電解質、性能などのモニター マイクロタービン: MHz から DC で動作するメソスケールの電力変換回路 マイクロタービン: 酸化によるマイクロ材料劣化を抑制する手法。 マイクロタービン: 異種材料の接合	イオウ耐性のある触媒、マイクロ化学的改質、新燃料輸送媒体 固体バッテリー用高伝導度ナノコンポジット電解質。ナノ構造電極。 5cm から 5 mm スケールへのパワーコンバータサイズ減少 高温でのシリコンの酸化を抑制する表面改質 熱ストレスの制御。界面の荒れの抑制	
	ナノテクによる補助/バックアップ電源	自立的な補助/バックアップ電源	軽量・角型、多用途電源など	
	兵士のパフォーマンスや忍耐力を向上させるための個人冷却	兵士の熱ストレスを緩和するための 150W 以上の冷却性能を 30W 未満のエネルギーで実現する機器	蒸気圧縮ベースの冷却器。 熱電素子。 蒸発ベースの冷却器。	
	兵士の状態モニタリング	“病院および薬局 “ on 兵士	作戦能力、NBC 検出、災害モニタリング	自動モニタリングおよび事前に設定された原則に基づく応答。 血圧の安定化。 堅牢かつ再構築可能なセンサー。 薬剤のコントロールドリリース。
		兵士の状態の直接モニタリング (生物化学、生理、感覚、心理状態)	健康、生理、感覚、心理状態などを個々の兵士毎直接モニターし、作戦遂行能力を判断	コンパクト、モジュール構造、オープンアーキテクチャー。 どの目的には何を測定すべきかが明確であること。 バイオコンパチブルであること。 など
	局所モニター	兵士が身の回りの NBC 環境などを適切な感度でリアルタイムモニター	超高感度ナノスケール N,B,C センサー、など。	

表 2. 2 Nano Soldier WS(2001)に基づく有望領域例 (3/3)

領域		概要	ニーズ
兵士の状態モニタリング	兵士のパフォーマンス予想	多様なデータを総合し、兵士のパフォーマンスを評価・予想	パフォーマンス定量化基準に基づく、最良/最悪パフォーマンスの計算。 ナノアレイセンサー等による情報記録。 生物模倣的データ解析によるパフォーマンス予想 など
	動的水の再利用—砂漠用蒸留スーツ	生体廃棄物からの水の回収—リサイクル。	兵士の携帯水の減少。 水の純化。 水の回収・供給システム。 など
	知覚、力の強化	電気、物理、電磁的、生物的手法を利用した知覚強化	

これらの要求に対し、MIT の Institute for Soldier Nanotechnology (ISN) 提案が採択され、2002年～2007年にかけて、軍から5千万ドルの資金が提供されることとなった。これに、民間企業が総額4千万ドル相当の資金および機器を提供し、計9千万ドルで研究開発が行なわれることとなった。

ISN では、ISN コンソーシアムを構築し、3つのメンバーシップで企業との共同研究を推進している。

1) ファウンディングメンバー

軍への ISN 提案段階で参画していた企業であり、大規模なコスト負担を行なうが、役員メンバーであり、全テーマに参画する。

DuPont (デラウェア州G) : 先進ファイバー、電子材料、バイオ材料、防護材料、不織布、ポリマーなどを製造するハイテクメーカーである。材料、特に繊維関連の専門性で ISN に寄与する。

Reytheon : レキシントンに拠点を持つ米国有数の軍事企業であり、兵員ニーズやセンサー技術などを ISN に提供する。

Partners Health Care 社 : ボストンに拠点を持つ同社は、マサチューセッツ総合病院や Center for the Integration of Medicine and Innovative Technology を傘下に持つ。医療関連の専門性を ISN に提供する。

2) 大企業メンバー

MIT の ISN ディレクターに認可されて、ISN に加わったメンバーであり、MIT に駐在する会社の代表を持つ。ISN のプログラムの支援のために相当額の資金を提供する。このメンバーとして Dow Corning 社が参画している。

Dow Corning 社：シリコンやシリコン製品・技術の専門性があり、電子や光学材料などで貢献する。

3) 小規模事業者メンバー

小規模事業者に認定された企業メンバーであり、MIT の ISN に有用な独特な中核技術を保有している企業。共同で研究を行う他、投資を行なうことで、技術的成果や IP にアクセスすることが可能となる。

このメンバー企業は、以下のとおりである。

Carbon Nanotechnology 社：ヒューストンに拠点を持つ単層ナノチューブの主要メーカー。CNT を混合することで、素材が驚異的な強度を有することである。

Dendritic Nanotechnologies 社：ミシガンに拠点を置く、デンドリマーのメーカー。

Triton Systems 社：ボストン近郊に拠点を持つ材料メーカー。透明衝撃防御材料の研究開発に熱心であり、ナノ粒子分散ポリマーを開発中である。

Nomatics 社：オクラホマの企業であるが、ケンブリッジに研究所を持つ。化学検出システムに中核技術を有する。

Zyvex 社：世界初の分子ナノテクノロジー企業であり、テキサスに拠点を持つ。CNT コンポジットやマイクロシステムで ISN に貢献する。

また、この他、コンソーシアムのメンバーではないが、ISN コンソーシアムの技術報告会などへの参加ができる制度があり、年間 25000 ドルの会費である。以下の 3 社がこの会員である。

W.L. Gore and Associates 社：デラウェアのフッ素系材料製造業であり、GORE-TEX®が有名

Honeywell 社：ニュージャージーの航空宇宙関連製品や制御機器、発電装置、機能性化学品、ファイバー、プラスチックなどを製造。軍からの受注比率はかなり高い。

Mine Safety Appliances 社：ピッツバーグの防護機器（人工呼吸器や軍用のガスマスク、軍用ヘルメット、衝撃吸収アーマー、携帯ガス検出器）を製造。

（2）ISN のテーマ

ISN では7つのチームが37のプロジェクトを実施している。

チーム1「エネルギー吸収材料」

このチームでは、以下の研究を推進している。

- ・ 超強力エネルギー吸収ポリマーの新しい分子アーキテクチャー
- ・ 超軽量ナノレリーフネットワーク、自己組織化マイクロトラス、光パターン化ナノコンポジット
- ・ 干渉リソグラフィを用いたネットワーク構造形成、バイオマテリアル足場構造へのポリマー浸透、計算機モデリングなどを行なっている。
- ・ 合成絹状ポリマーの合成及びレジンスピニング
- ・ 弾道衝撃イベントの1ショット時分解スペクトロスコーピー
- ・ 弾道及び爆発防御のための生物学的及び合成のナノ構造材料のマルチスケールデザインと評価

チーム2「力学的にアクティブな材料・デバイス」

このチームでは、以下の研究を推進している。

- ・ ナノ構造ポリマーアクチュエータ
- ・ 伝導性ポリマーアクチュエータの最適化
- ・ アクチュエータ及び電気力学的応用のための液晶状熱可塑性エラストマー
- ・ アクチュエータのための化学的にスイッチできる磁性材料

チーム3「センシングおよび中和作用」

このチームでは、以下の研究を推進している。

- ・ 殺微生物、抗ウィルス性、対抗孢子性ファブリック及び他の材料
- ・ 光学センシングのためのIR検出システム
- ・ ウィルス／ペプチドバイオアレイセンシングシステム
- ・ 化学的毒物不活性化コーティングとしての dendrimer／ナノ粒子
- ・ 導電性及び半導電性有機分子およびポリマーによる高感度センサー

- ・ ブロックコポリマーに基づく複合ポリマーセンシングシステム
- ・ 未知の病原性菌用ハイパフォーマンス細胞ベースセンサー
- ・ ポリマーベースナノコンポジットの光学特性の計算、予測
- ・ 生細胞病原体センシングのためのナノ構造表面

チーム4「兵員の医療技術向けバイオマテリアルおよびナノデバイス」

このチームでは、以下の研究を推進している。

- ・ スイッチ可能な表面
- ・ 非侵襲診断装置及び負傷中和剤の輸送
- ・ 半活性、可変インピーダンス材料：生物力学的設計制御
- ・ ナノ構造生物医学的ファイバー製造

チーム5「製造および分析—ナノファウンドリー」

このチームでは、以下の研究を推進している。

- ・ ファイバー及びファイバー状物質の製造
- ・ ナノスケール多層フィルムの製造
- ・ 化学気相輸送ポリマー
- ・ ナノ構造折り紙：2D膜の折り畳みによる3Dナノパターンニング

チーム6「材料およびプロセスのモデリング、シミュレーション」

このチームでは、以下の研究を推進している。

- ・ 力学的、電氣的及び化学的な機能のためのナノ粒子の設計及びチューニング
- ・ 新規電気浸透流利用マイクロ流体デバイス
- ・ ポリマーアクチュエータの電気—構造モデリング
- ・ 織物の変形と故障挙動のモデリング及びシミュレーション
- ・ 弾道的脅威がアーマー背後に与える影響のシミュレーション
- ・ 爆発と兵士の相互作用のハイパフォーマンスシミュレーション

チーム7「システムズデザイン、硬化、およびインテグレーション」

このチームではナノテクノロジーを最も有効に活用するための戦闘服アーキテクチャーについて検討している。

これら、研究内容を見ると、ISN は、軍のニーズに基づく研究を進めているとはいえ、繊維やソフトアクチュエータの先端シーズの実用化を通じた、産業基盤の確立を意図してのものであると見ることができる。

2. 4 我が国におけるデュアルユースが期待されるナノ技術領域

平成17年4月13日に、総合科学技術会議安全に資する科学技術推進PTから「安全に資する科学技術のあり方（中間報告）」が報告された。この中で、国民生活の危機に関する3つの領域に関して目標が設定された。

これらの中で、1) 主として防衛分野に最大のニーズがあり、かつ、防衛分野が初期市場を構成することで、広く民生利用が進むと期待されているもの、2) 武器輸出3原則などに抵触する可能性が少なく、開発した産業界が比較的自由に民生応用を図れるものが、プログラムドデュアルユース研究開発ターゲットとして適当であると考えられる。またナノテクノロジーの寄与という点も産業振興という面で重要である。

このターゲットの例として、以下があげられる。

- ① バイオテロ用防護服
- ② 自走式爆発物センサー
- ③ 災害用高性能人体センサー
- ④ 超軽量高強度耐熱材料

平成17年4月13日に、総合科学技術会議安全に資する科学技術推進PTから「安全に資する科学技術のあり方（中間報告）」が報告された。これは、9. 11テロ以降の世界的なテロリズムの拡散や、大規模自然災害、都市空間における重大人為災害、世界的な規模での新興・再興感染症等の発生、国際的な組織・凶悪犯罪の深刻化や高度情報通信ネットワーク社会の弱点を狙ったサイバー犯罪の急増などに対処するための「安全に資する科学技術」のあり方について検討・提言したものである。

この中で、国民生活の危機に関する3つの領域に関して目標が設定されている。

(1) 国の安全確保

- ① 我が国の総合的な安全保障に資するための、基幹的な科学技術の研究開発に関する包括的な産学官の連携体制の構築と民生用研究成果の積極的な活用。
- ② 世界的なNBC兵器等の拡散と、これらを使用したテロリズムや我が国周辺の不審行為

等に対処するための、監視・検知・追跡技術、各種センサー技術、被害予測・軽減技術等の向上。

(2) 社会・経済の安全確保

①高度情報通信ネットワーク社会における、サイバー攻撃、サイバーテロ、サイバー犯罪及び事故等に対処するための、ネットワークの信頼性技術、ソフトウェアの安全性技術、被害の未然防止技術、迅速な攻撃対処技術、暗号技術等の向上。

②大規模自然災害や、局地激甚災害などに対する観測・監視技術、減災対策技術、事後対応技術（応急復旧、復興技術等）の向上。

③脆弱な都市空間などにおける、自然災害、重大人為災害に対する脆弱性評価技術、ハザードマップ作成などによる被害予測・軽減技術等の向上。

(3) 個人生活の安全確保

①新興・再興感染症等の突発的な発生に対処するための、予防ワクチン開発・迅速診断・治療技術等の向上と、対応体制の整備の充実。

②多発する犯罪を抑止し、近年の組織を背景とする犯罪の深刻化や新しいタイプの犯罪の出現に適切に対処するための捜査支援技術、生体認証技術等の向上。

尚、上記3つの領域全てに共通する、情報収集・分析技術、想定外の脅威への対処も含む脆弱性発見・被害予測のための解析・シミュレーション技術、様々な脅威対処技術を最適に組み合わせる手法、各種シミュレーション結果の検証技術、現場における第一対応者（ファーストレスポンド）の活動支援技術、などの脅威対処技術の向上についても推進すること、安全に資する個々の要素技術を統合し、システム化する技術についても、実際の現場における活用の観点から極めて重要であり、これらの推進にも十分な配慮を行うことなどが述べられている。

これらの中で、1) 主として防衛分野に最大のニーズがあり、かつ、防衛分野が初期市場を構成することで、広く民生利用が進むと期待されているもの、2) 武器輸出3原則などに抵触する可能性が少なく、開発した産業界が比較的自由に民生応用を図れるものが、プログラムデュアルユース研究開発ターゲットとして適当であると考えられる。またナノテクノロジーの寄与という点も産業振興という面で重要である。

上記に該当するターゲットの例として、以下があげられる。

① バイオテロ用防護服

世界各国で、バイオテロなどの危機に対応したバイオ防護服の開発が軍を中心に進められている。我が国でも、独自のバイオ防護服の開発・整備が必要である。バイオ防護には、ナノテクノロジーが大きな役割を果たすと期待されること、また、災害派遣活動などで最も潜在的ニーズが大きいのは防衛庁—自衛隊であることから、開発ターゲットとして適当であると思われる。

② 自走式爆発物センサー

近年、国際平和維持活動により、自衛隊が海外に派遣される事例が増加している。このような際に、隊員の危険を低減するためのツールとして、高感度爆発物センサー等が有用である。我が国には優れたロボット技術がある。爆発物を高感度で検出するセンサーシステムを開発することで、無人で爆発物を検知するシステム構築が可能となると期待される。

③ 災害用高性能人体センサー

災害派遣時に、被災者を早期に探索・発見することは極めて重要である。このようなシステムは、既に複数開発されているが、より高度かつ高速に探査するシステムが構築されることが望まれている。

④ 超軽量高強度耐熱材料

防衛装備品全般の構造材として、かつてのチタン合金やCCコンポジットと同様、軽量、高強度、かつ耐熱性に優れた素材のニーズは大きい。しかしながら、このような素材の初期価格は極めて高価なものにならざるを得ず、民間企業が明確な市場の見込み無しに実用化開発をしづらい状況にある。防衛分野がファーストカスタマーとなることで、この問題は解決されると期待される。

3. 防衛装備として必要なスペックの設定

3. 1 バイオテロ用防護服

NBC 災害やテロ対策用防護服は、危険レベルによって、それぞれスペックが異なっている。

レベル A は呼吸器、皮膚、眼、粘膜を最高のレベルで防御することができ、呼吸器のマスク内は陽圧になる。有害物質が不明で、最も危険度が高い場合に着用する。

蒸気、ガス、液体、細菌等のあらゆる形態の生物化学物質による汚染下での使用が可能であるが、欠点は、重装備で細かい活動はできない。また、空気ボンベに充填された空気を呼吸するため、活動時間は空気ボンベの容量により決まり、およそ 20 分から 30 分に限定される。

レベル B は呼吸器防護ではレベル A と同等であるが、皮膚に関しては一段低いレベルである。

レベル C の防護服は、有害物質の性状、濃度等が確認されている場合に使用され、濾過式マスクと使い捨て化学防護服を着用する。応急救護所あるいは病院での初療、除染の際に医療関係者が使用する可能性がある。マスクには毒物の種類に適したフィルター又は、吸収缶を選択する。

現時点でのレベル A 防護服は、耐有機溶剤性などに加え、例えば以下のような機能を持つ。

表 4. 1 レベル A 防護服の仕様

使用薬剤	濃度	非透過時間	試験方法 (MIL-STD-282)
サリン (GB)	10 g /m ²	>480 分	206.1.1
ソマン (GD)	10 g /m ²	>480 分	206.1.1
VX ガス	10 g /m ²	>480 分	206.1.1
ルイサイト (L)	15 g /m ²	>480 分	204.1.1
マスタードガス (HD)	15 g /m ²	>480 分	204.1.1

これを満たすため、布地としては、10 層以上の多層化が施されている他、接合部のシール構造などに工夫がこらされている。

活動のためには、酸素ボンベ・レギュレータなどが必要であることに加え、ある程度の長時間活動の際には防護服内部の熱対策として携帯冷却器なども装備せざるを得ない。このため、運動性が著しく低下する。

次世代 BC 防御服は、以下の能力を有していることが望ましいと考えられる。

- 1) 現状のレベルA防御服と同等のBC耐性を有していること。
- 2) 機械的衝撃にもある程度耐えること。
- 3) 火災などとの複合災害にも耐える耐熱性があること。
- 4) 酸素ボンベや携帯冷却装置などはできる限り不要化すること。
- 5) 周囲のBC環境をモニターできること。

3. 2 自走式爆発物センサー

爆発物が、通常の地雷のように、金属部分をもっている場合、電磁誘導を利用した金属探知器などが活用可能である。また、マイクロ波を用いる地中レーダ（GPR: Ground Penetrating Radar）や赤外線センサー等もプラスチックを含めた検出が可能であるため活用が検討されている。

一方で、化学センサーやバイオセンサ、核磁気共鳴法などのように、爆発物を直接検出するためのセンシング技術についても研究開発が進められている。

近年の技術革新により化学センサーやバイオセンサの感度は大幅に向上していることから、爆発物から漏れ出る極めて微量の蒸気成分を検知する、化学センサ、バイオセンサを小型化・高感度化し、従来の物理センサーとともに自走ロボットなどに搭載することができれば、爆発物の安全な検出に有効であると期待される。

3. 3 災害用高性能人体センサー

阪神淡路大震災以来、大規模災害の被災者の早急な位置同定の重要性が広く認識されるようになり、救助用探索機器の開発が進められている。

神戸大学レスキューロボット機器研究会では、救助用探索機器が備える要件として、以下をあげている。

- ・コンクリート瓦礫、鉄骨、材木、土砂などを通して探索可能。
- ・探索に当たり走査面などの基準平面を必要としない。
- ・被災者の意識の有無に関係なく探索できる。できれば生死の判別が出来る。
- ・被災者に非接触で探索可能。出来れば遠隔探索可能。
- ・天候に左右されず、昼夜分かたず使用できる。
- ・人手で運搬可能な重量である。
- ・組立、準備が短時間で可能。高精度よりも短時間で探索できる。
- ・自動車などからの給電が可能なバッテリー駆動である。

- ・操作及びデータの解釈、判断に高度な専門知識を必要としない。
- ・出来れば災害時以外の日常活動においても活用される機器である。

被災者の探索に利用されている方法には以下がある。

- 1) 光学的手法による探索用センサー
- 2) 電磁波を利用した探索技術
- 3) 音響を利用した探索技術
- 4) ガス、臭いを利用した探索技術

被災者探索用救助ロボットは既に幾つかの大学などで開発されている。

例えば、神戸大学工学部で開発された「モイラ 2」は、4つの台車とそれらを連結する3つの関節から構成され、不整地の多い災害現場や段差や溝での容易な移動が可能であり、先頭台車に設置した CCD カメラで操縦と人体検索を行うものである。サイズは幅 165mm × 高さ 120mm × 長さ 1,100mm であり、重量は 16kg である。

3. 4 超軽量耐熱材料

ガスタービンエンジン、航空機のジェットエンジン、スペースシャトルから将来の高速輸送機として期待を集めているスペースプレーンまで、エンジンとその周辺、機体構造、機体表面に用いられる材料には、超高温で静的および動的な荷重が加わることになる。そのような苛酷な使用環境下で用いることができる材料の実現を目指して、あらゆる系統の材料の性能向上、新素材の開発が進められている。例えば、NIMS では、Ni 基調合金の開発を一貫して実施しており、その性能は、年々向上している。

また、大阪大学や岩手大学では、軽量耐熱材料としての TiAl 金属間化合物の開発が進められている。TiAl 系は、1) 密度が Ni 基超合金の約 1/2 と軽量、2) 単位密度あたりのクリープ強度（クリープ比強度）が 850°C において現用の Ni 基超合金より優れている、3) 高温における耐酸性は Ni 基超合金には及ばないが、Ti 基耐熱合金や Fe 基耐熱合金より優れている、といった特徴を有している。加工上の欠点である引張り伸びについても、微量の Be の添加などで改善する目途がたちつつある。更に軽量の材料としては、Ni 基カーボンファイバー複合体なども研究されている。

このように耐熱・軽量などを実現する材料系としては、幾つかの候補が見出されつつあるが、製造コストや市場性の面で、実用化には至っていないものが殆どである。

4. スペックをクリアするためのナノ技術開発課題の整理

4. 1 バイオテロ用防護服

これに役立つナノテクノロジーとしては、例えば以下のような要素技術がある。

- ・ 物質輸送は完全にプロテクトでき、熱伝導度が高いテキスタイル
- ・ 化学物質やバイオ素材を完全に吸着するナノ吸着剤複合テキスタイル
- ・ ナノ繊維フィルターからなり、有害化学物質を不透過する呼吸器
- ・ 毒物の有無が判別でき、フレキシブル性を持つことで、防護服表面に実装できる薬物検査チップ
- ・ ナノ無機-有機コンポジットによる力学的強度と靱性の両立

4. 2 自走式爆発物センサー

これの中核となる化学センサ、バイオセンサ自体がナノテクノロジーそのものといえる。

化学センサについては例えば以下の候補技術がある。

- ・ 赤外分光法: 火薬物質中の特定の化学結合に固有な光吸収帯を用いて TNT の微量蒸気の存在を測定。
- ・ 光音響分析法: 特定の波長のレーザーを照射することにより励起された TNT 分子からの放出エネルギーにより物質を加熱し、その物質の膨張による粗密波を音波として検知
- ・ レーザー蛍光法: 半導性有機ポリマーと光導波路、グレーティング、光ファイバーからなる薄膜型センサーで爆発物分子を検出 (Nature,2005)
- ・ スマートサンド、なる TNT を特異的に吸着する粒子を用い、TNT 吸着時の蛍光波長の変化を検出 (SNL)
- ・ シリコンナノワイヤーの表面にポリマーをコートして蛍光ベースで ppb レベルの TNT 検出

バイオセンサは、基本的には TNT に抗体反応を起こすような (人工) 分子を活用して TNT の微量蒸気の存在を測定するものであり、特異的に結合する分子の探索 (合成) + 高感度トランスデューサの開発が必要となる。

トランスデューサ技術としては、1) カンチレバー、2) 水晶振動子、3) 表面弾性波、4) 電気化学的検出方法など、様々な方法が実用化されている。

4. 3 災害用高性能人体センサー

自走式レスキューロボットは既に複数の開発例がある。その多くは、画像センサーを搭載しているが、これに加え、呼吸時に生じる炭酸ガスを検出するセンサー、音響センサー、体温センサー等、多様なセンサーが搭載されることで、被災者発見の確率が高まると期待される。

炭酸ガスセンサー等では、ヘビーデューティーな固体電解質型のものが開発されており、一部実用化されている。材料系としてはリチウム系固体電解質などが用いられている。

ナノテクノロジーを利用することで、比表面積の増大、反応領域の極小化などを通じ、高感度化、低消費電力化が可能となると期待される。

4. 4 超軽量耐熱材料

超軽量耐熱材料は、実験室レベルや試作品レベルでは、幾つかの候補材料がある。実用化を阻害しているのは、コストであるといえ、防衛分野が初期市場の一翼を担うことができれば、実用化が進むと期待される。

尚、ナノレベルの金属-無機コンポジット化や、組織のナノレベルの制御、ナノ空間の導入などで、性能を格段に向上できる可能性があり、超軽量耐熱材料に対する初期市場が明確になれば、この分野での実用化は大きく進展すると期待される。

5. 技術開発の民生用途への波及効果と新規市場創出規模等経済効果の検討

5. 1 バイオテロ用防護服

防護服単独で見ても、Business Communications Company, Inc.のレポート(2005年9月)では先進的な防護服や防具、呼吸マスク、防護手袋の米国市場は、現在年間23億米ドル規模となっており、年平均成長率7.9%で2010年には33億5,000万米ドルを超えると予想されている。

日本では、防護服市場は数百億円規模といわれているが、バイオ防御機能を有する繊維・フィルターなどでは将来的には2000億円以上の市場が期待される。

5. 2 自走式爆発物センサー

先進爆発物センサーとしての化学センサー、バイオセンサーの市場規模は、決して大きいものではない。仮に全国の消防本部(848)に年平均1台ずつ配備されたとしても高々1000セット程度/年規模である。

しかしながら、比較的単価を高く設定することが可能であることから、小規模の市場であっても実用化が可能であると思われる。また、ここで開発した技術、特にトランスデューサ技術は汎用性があり、環境センサー一般に活用可能である。この場合、関連市場も含め、1000億円/年規模の市場形成の可能性はある。

5. 3 災害用高性能人体センサー

これについても、比較的高価格であっても初期市場として成立させることができれば、将来的には巨大な市場形成につながる可能性がある。例えば、自動車に搭載された場合、年間1000万台規模の市場となる。産業用機器や燃料電池、更には家庭での炭酸ガスセンサーとして普及した場合、年間1億個以上のセンサー市場が形成されると想定される。単価200円として、センサー単独で200億円、関連市場も含めると1兆円を優に超える市場規模となる。

5. 4 超軽量耐熱材料

耐熱合金の成分であるNiの年間市場規模が1.5兆円規模であることから見ても、軽量・耐熱材料の市場規模は莫大なものがある。但し、高コストを許容しうる市場は限定されており、価格と性能の折り合いで、数十億円程度にしかならない場合もある。初期市場としての防衛分野、あるいは航空宇宙分野の寄与が実用化の鍵となる。



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

非 売 品
禁無断転載

平成17年度
防衛装備の高度化に貢献するナノテク技術と
その民生利用に関する調査研究報告書

発行 平成18年3月

発行者 社団法人 日本機械工業連合会
〒105-0011
東京都港区芝公園三丁目5番8号
電 話 03-3434-5384

株式会社 三菱総合研究所
〒100-8141
東京都千代田区大手町二丁目3番6号
電 話 03-3277-0898