

次世代製造技術の研究開発 ドイツ編

平成 27 年 1 月

研究開発戦略センター 海外動向ユニット
フェロー 澤田 朋子

1. ドイツ製造業の概要

ドイツの産業構造の基礎は 1920 年代に築かれたといわれている。自動車産業を中心に、製造業の強い経済は、GDP の約 30%を製造業が占めている。うち、約 5 割が輸出されており、ものを作って貿易をするというのがドイツの経済の基本的なモデルとなっている。ものづくりに根差した経済という側面だけを見ると、我が国と似ているが、輸出額が大きく異なっている。但し、ドイツの輸出の約 60%は EU 域内向けであり、共通の通貨をもつ EU 諸国へのものの移動は、日本のそれと単純な比較は意味がない。

とはいえ、世界がグローバル化し、情報の流れが早まっている現代、ドイツも第三次産業の割合が年々増している。GDP の 70%に近いサービス業とものづくりの統合化についての議論が活発になってきている。また、他の先進国と同様に高齢化の一途をたどり、近い将来労働人口が減少することは明らかで、特に熟練した労働者が減ることに対する危機意識は、製造業に立脚している日本同様、非常に強い。デジタル化が進む世の中で、若い人材の育成や職業訓練については、もともと職業教育で名高いドイツでも大きな課題である。さらに、これまで中国を始めとしたアジア諸国や南アメリカ諸国では組立てを中心とした単純で工数の多い作業を担っていたが、徐々に技術力、イノベーション力をつけてきており、今後、工業先進国の脅威となりかねない。とりわけ、中国に対する危機感ドイツでも強い。中国の改革開放が進む過程で、ドイツは中国をマーケットとして重視してきた。また、現地生産のための技術移転を積極的に進めてきたが、現在そのいき過ぎに対する反省もあって、中国への対抗策を真剣に検討する時期にきていると認識されている。

今後もブランドとして、“made in Germany”を維持するために、安い人件費と大量生産による低コスト製品に対抗するためにも、付加価値の高いハイテク製品を作り続けなければならない。そのために、ドイツ政府は 2011 年にアクションプラン **Industrie4.0**¹(インダストリー4.0)を発表した。まずは次項で、このアクションプランが作られた背景を述べ、次章で政策の具体的な内容を記述する。

1.1 製造業の位置づけ

自動車を始めとして、工作機械、化学といった製造業は、これまでドイツ国内の雇用を生み出してきた。こうした産業を支えてきたのがドイツの工学教育であり、マイスター制度²、デュアル教育³といったドイツ特有の教育制度でもある。しかしながら 70 年代のオイルショック、80 年

¹ **Industrie** は英語 **Industry** のドイツ語訳。ドイツ政府は“**Industrie4.0**”を新しいコンセプトとしてグローバルに認知してもらうために英訳せず **Industrie** としてそのまま表記している。そのため同報告書でもその例に倣う。

² 中等教育を終えた後、職工として企業に所属し、その一方で職業学校に通い熟練工の試験を受ける。熟練工になった後も複数年の研鑽を積んだ後で、職人（マイスター）を受験し、その資格を得る。現在のドイツでは 41 のマイスター業種がある。

³ ドイツ語圏（スイスやオーストリア）に特有の制度で、教育と職業訓練を同時に進めるシステム。最終的にはマイスターの資格取得を目指すものであるが、現在では専門大学（**Fachhochschule**）と企業での研修を並行して受けるシステムなども混在し、職人だけでなく、管理部門の人材も同様の制度で育成している。

代のマルク高や人件費の高騰を原因とし、生産拠点としてのドイツの地位が危うくなってきた。大企業の一部が繊維産業を皮切りに、自動車産業までもがマーケットに近い現地生産を推進し、ドイツ国内の失業率は徐々に上がり始めた⁴。さらに、伝統的なマイスター制度や大学教育は、米国などと比べても資格取得や卒業までに長い時間がかかり、IT のようにめまぐるしく進化発展する分野の人材育成が、産業界の需要に追い付かない状況が生まれ始めたのである。このような環境の中、歴史的な大イベントが起こる。ベルリンの壁崩壊(1989年)とそれに続く東西ドイツの再統一(1990年)である。

(1) 1990年代の低迷期「ドイツ病」

東西ドイツ再統一の熱狂は長く続かず、1992年には景気が後退して不況が始まった。旧東ドイツ地域への公的資金の投入が連邦政府の財政を圧迫しただけでなく、同時期に一気に民主化した旧東欧諸国で急増した対外直接投資によって製品輸入が増大した。こうして90年代後半には、旧東ドイツ地域は大規模な財政投融资に関わらず失業率が上がり続け、一部の州では20%を超えるようになった。社会保険、年金、税金と構造的な問題を抱えながら、改革が中々先に進まない「改革渋滞」と呼ばれる時期が続いた。発言権の強い労働組合を背景に雇用者の権利が守られる一方で、企業の経営は困難になり、ドイツ全体で失業者は600万人を超え、10%代に高止まりしていた。米国で始まったIT革命や金融取引で台頭する欧州の小国を尻目に、ドイツでは産業構造の変革が遅れ、鉄鋼や化学といったこれまでドイツを支えてきた重厚長大産業が低迷した。

(2) 2000年代の景気回復と現在

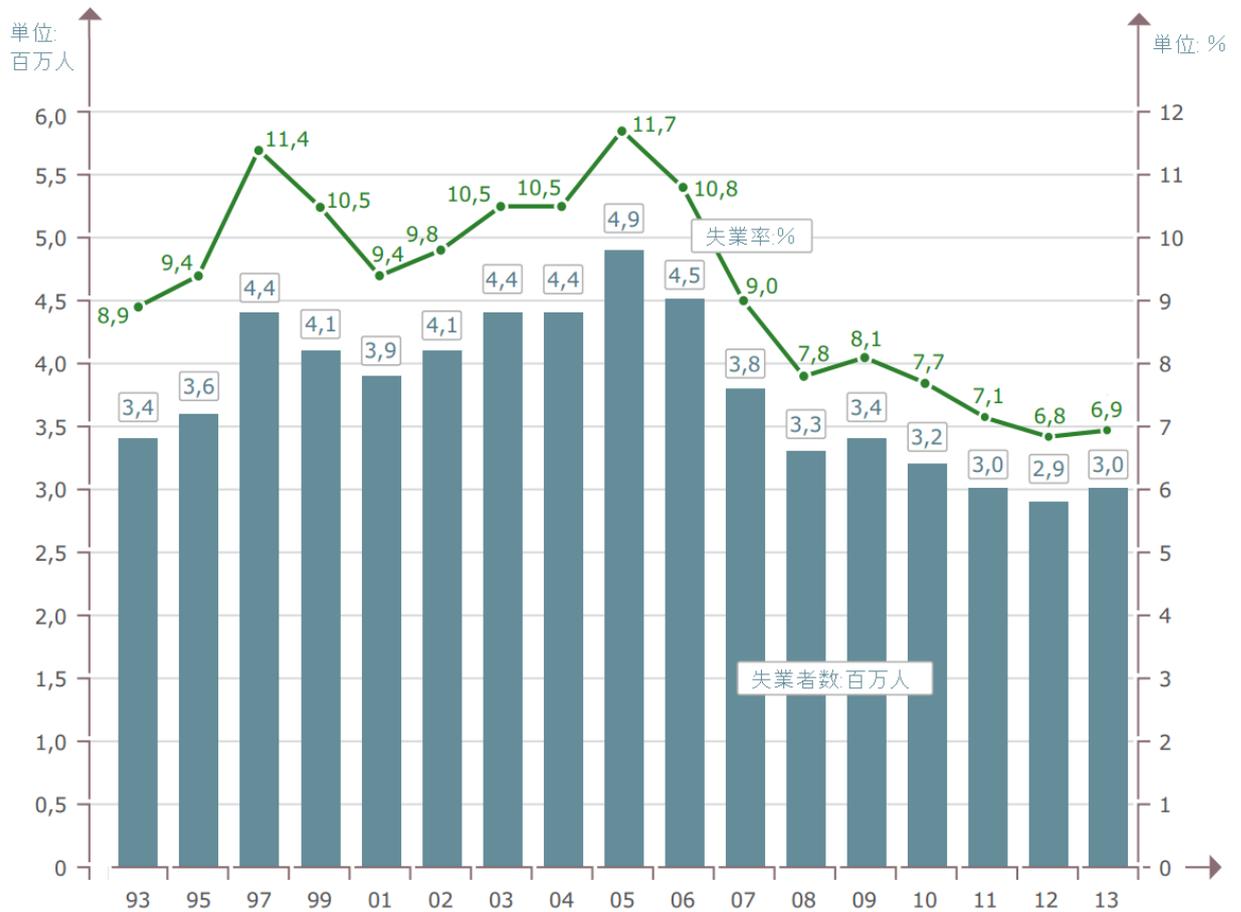
16年の長きにわたって政権の座にあったキリスト教民主同盟(CDU:コール首相)に代わって、1998年の総選挙で第一党となったのが、社会民主党(SPD:シュレーダー首相)だった⁵。シュレーダー首相は、失業率を低下させることを政策の第一目標にした。2003年に「アジェンダ 2010⁶」という名の大改革、労働コストを減らすために、社会保障サービスを大幅に削減する改革に踏み切った。年金の支給開始を65歳から67歳に引き上げ、物価スライドをなくしたり、人口の減少に合わせて、年金額の伸びを抑制するシステムを導入した。最も大きかったのは失業保険であり、この一連の改革にはフォルクスワーゲン社取締役だったハーツ(Peter Hartz)を委員長に任命し、失業保険を生活保護と同じ水準とするなど抜本的な改革を断行した。2005年の総選挙で、メルケル首相率いるCDUが政権与党に返り咲いた頃から、ドイツ経済は持ち直し、徐々に回復した。2005年に11.2%に達した失業率は底を打ち、リーマンショック後の景気後退で一時期上昇に転じたものの、現在は5%ほどに低下している。こうして雇用の流動化を促した結果、格差が拡がり貧困層は増えたという批判はあるが、一定の成功は収めたものといえる。

⁴ 労働政策研究・研修機構 http://www.jil.go.jp/institute/reports/2004/documents/L-7_03_02.pdf

⁵ SPDと緑の党(90 Die Grünen)の連立政権。

⁶ アジェンダ 2010という政策の名称は、2000年のEUリスボン戦略、「知識社会に向けた教育・訓練、より積極的な雇用政策、社会保障制度改革・社会的排除の解消を2010年までに達成することを目指した戦略」に依拠する。

図表 1: ドイツの失業者数と失業率の推移(1993-2013 年)



出典: ドイツ連邦雇用庁 (Bundesagentur für Arbeit :BA) より

その後、2008年のリーマンショックからも比較的早く立ち直ったドイツは、2010年のユーロ危機でも指導的立場で事態の收拾に臨んだ。

1.2 指標で見るドイツの経済

(1) 経済指標⁷

2004年頃の失業率は年平均で10%を超える状態であったが、現在は5%台にもあで回復した。2008年のリーマンショック後に落ち込んだGDPも1年で持ち直した。現状、やや成長率は鈍っているが、景況感は悪くない。

	2004年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
実質 GDP 成長率	1.2%	-5.1%	4.0%	3.3%	0.7%	0.4%
名目 GDP 総額	2,195,700	2,374,200	2,495,000	2,609,900	2,666,400	2,737,600
年平均失業率	10.5%	7.8%	7.1%	5.9%	5.5%	5.3%

⁷ EU 統計局 (EUROSTAT) <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>

経常収支	102,368	140,724	159,329	178,427	198,570	205,952
輸出額	731,479	803,012	949,629	1,058,897	1,093,630	1,093,788
輸入額	575,401	664,143	795,666	901,487	905,378	895,175

(単位: 100 万ユーロ)

 (2) 粗付加価値産業別構成 (名目)⁸

部門	2004 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
農林水産業	21,210	15,890	17,810	18,460	19,980	19,060
鉱工業	580,930	588,860	675,730	716,980	728,260	741,220
うち、製造業	434,940	413,120	489,300	529,790	534,360	535,460
建設業	83,990	93,560	102,100	109,180	111,320	114,760
サービス業	1,381,410	1,512,300	1,541,620	1,599,450	1,638,550	1,693,570
情報通信業	81,360	93,640	90,230	94,660	96,020	96,210
金融・保険業	103,900	93,110	101,780	101,470	94,420	99,680
国内総生産	1,983,540	2,117,050	2,235,160	2,334,890	2,386,790	2,453,850

(単位: 100 万ユーロ)

(3) 輸出統計 (国、地域別)

EU 域内への輸出が 6 割に迫る。国別に見れば、米国、中国への輸出が多い。

	2013 年	
	金額	構成比
EU27	621,097	56.8%
アジア・大洋州	151,157	13.8%
中国	67,025	6.1%
日本	17,125	1.6%
北米 (NAFTA)	106,176	9.7%
米国	88,375	8.1%
合計 (その他含む)	1,093,811	

(単位: 100 万ユーロ)

(4) 輸出統計 (品目別)

品目別では、機械、輸送機器の輸出が多い。

	2012 年	2013 年	
	金額	金額	構成比
機械および輸送用機器	528,945	521,524	47.7%
道路走行車両	183,026	181,924	16.6%
乗用車	114,136	111,828	10.2%
自動車部品	45,505	47,065	4.3%
電気機器	80,040	80,522	7.4%

⁸ EU 統計局 (EUROSTAT)

その他一般工業用機械類	78,522	79,117	7.2%
化学製品	170,950	172,299	15.8%
医薬品	56,031	56,826	5.2%
原料別製品	142,635	138,054	12.6%
鉄鋼	27,423	24,684	2.3%
非鉄金属	22,569	20,971	1.9%
雑製品	109,795	110,763	10.1%
計測・制御機器	36,230	36,942	3.4%
食料品および生きた動物	48,735	50,891	4.7%
特殊取扱品	28,722	36,878	3.4%
鉱物性燃料、潤滑剤	33,107	33,134	3.0%
石油、石油製品	19,889	18,055	1.7%
天然ガス	9,113	10,909	1.0%
電力	3,671	3,757	0.3%
非食用原材料(鉱物性燃料除く)	21,463	19,348	1.8%
飲料およびたばこ	8,644	8,254	0.8%
動植物性油脂、脂肪、ろう	2,772	2,665	0.2%
合計	1,095,766	1,093,811	

2. Industrie4.0 とは

科学技術イノベーション基本政策「ハイテク戦略 2020」(後述)の「未来プロジェクト」という名のアクションプランの一つで、2025 年頃に達成を目標にしている。同アクションプランでドイツ政府は、Industrie4.0 と名付けた高度な製造技術の研究開発を掲げ、産官学一体の大規模プロジェクトを推進している。Industrie4.0 はもののインターネット(Internet of Things: IoT)や生産の自動化(Factory Automation)技術を駆使し、工場内外のモノやサービスと連携することで、今までにない価値や、新しいビジネスモデルの創出を狙った次世代製造業のコンセプトである。現代の製造業が直面している課題は、主に生産性、スピード、柔軟性であり、Industrie4.0 を実現することによってこれらを克服し、このための技術開発や産業構造の変化を推進する。Industrie4.0 の実現には、製品設計や生産設備設計、生産、メンテナンスに至るバリューチェーン全体を網羅した、多種多様な ICT 基盤が必要になる。

2.1 政策策定の経緯

ドイツで初めて制定された科学技術イノベーション基本政策の「ハイテク戦略」は、個人、企業、社会が継続的にイノベーションを興すことができるような環境を整備することを目的に 2006 年に発表された。ドイツの技術革新能力を維持し、産業拠点としての地位を確固たるものにするため、2007 年から 2010 年にかけて 17 の技術分野と関連する横断的な活動に 146 億ユーロを投入した。その後、2010 年に第二次となる「ハイテク戦略 2020⁹」が制定され、更なるアカデミア、産業界、政府の連携強化を推進している。先の戦略と異なる部分は、社会的課題、グローバルな問題の解決を図るために数々の施策やプロジェクトを実施するという、ニーズ型の政策になっている点である。「ハイテク戦略 2020」で抽出された重点分野は、環境・エネルギー、健康・食糧、輸送、安全、通信の 5 つで、同分野のさまざまな課題の解決のために 10 項目の「未来プロジェクト」というアクションプランが 2011 年までに順次発表された。そのうちの 하나가 Industrie4.0 である。

ハイテク戦略 2020 の未来プロジェクトは発表当初(2010 年)、11 項目あった。うち「ITを活用した省エネ」と「未来の労働形態・組織」が統合され、10 番目のアクションプランとして 2011 年 11 月に可決の運びになった。これに先立つ 2011 年 1 月に連邦教育研究相の諮問機関である研究連盟 経済・科学(Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft)に作業部会が発足¹⁰。アクションプランの策定を受けて、研究連盟とドイツ工学アカデミー(acatech)が合同の検討部会を作り、年明けて 2012 年 1 月から 12 月まで、実施勧告提言を作成することになった。同部会の会長は 2 名体制となっており、1 名は産業界代表としてボッシュ社副社長のダイス博士¹¹、もう一名はドイツ工学アカデミー会長のカーガーマン教授¹²である。

未来プロジェクト Industrie4.0 が策定される以前から、ハイテク戦略の枠組みの中では情報・通信および製造技術の分野が重点化され、複数のファンディングプログラムが実施されていた。

⁹ 2011~2014 年の予算見込み：84 億€

¹⁰ ワーキンググループ 通信 (Kommunikation)

¹¹ Robert Bosch GmbH Dr. Siegfried Dais

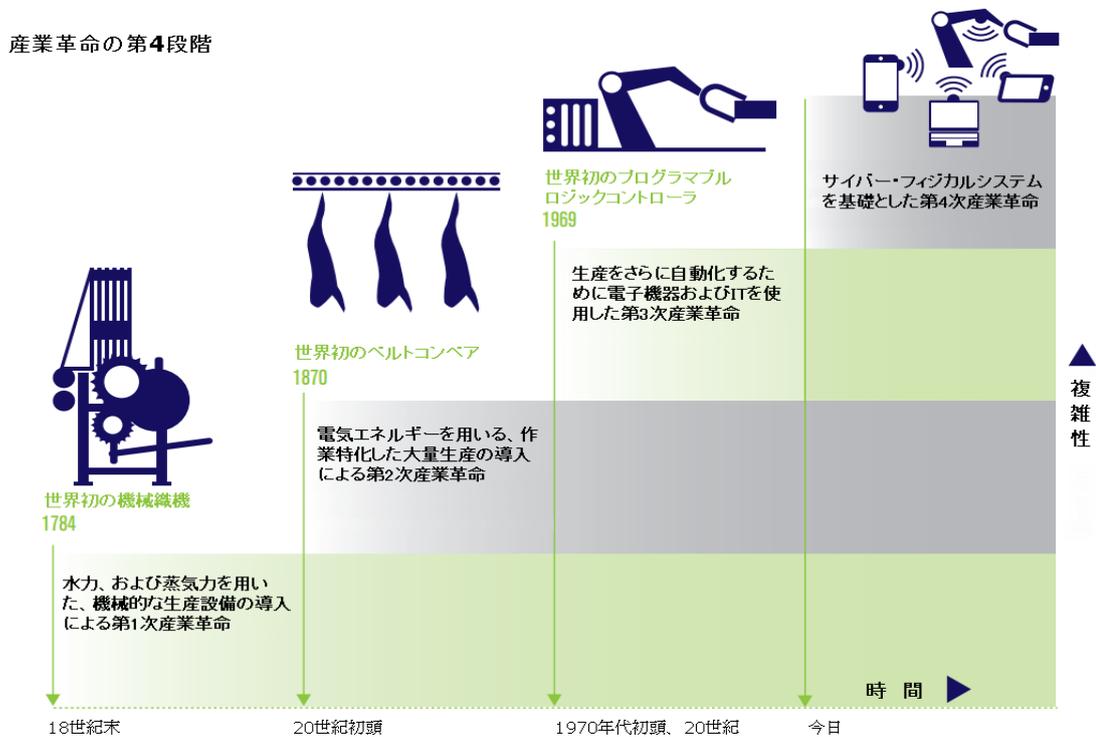
¹² Prof. Dr. Hennig Kargermann (元 SAP AG 取締役)

教育研究省 (BMBF) 傘下では、SPE¹³、SemProM¹⁴、経済エネルギー省系 (BMWi) 主管による、NextGenerationMedia¹⁵、Autonomik¹⁶などである。また、2011年から助成が始まった両省共同のファンディングプロジェクトICT2020は、助成総額も大きい大規模なファンディングである。Industrie4.0 は政策としては新しいものの、ドイツ国内では次世代の製造技術に関する研究開発が推進されてきたのである。

2.2 Industrie4.0 の定義

Industrie4.0とは、第四次産業革命の意である。第一次革命は18世紀の蒸気機関による機械的な生産設備の導入、第二次産業革命は19世紀後半の電気による大量生産を指すことは議論を待たない。第三次以降は専門家によって定義が分かれるが、ドイツ政府の見解は、70年代のコンピューターによる生産の制御との見解を示している。そして、現在人類は第四次産業革命の端緒に立つと位置づけ、ドイツは其中でイニシアティブを取ることを目指している。

図表 2: 産業革命の各段階



出典： Industrie4.0 プラットフォーム実施勧告提言書 2013 より

情報通信技術と生産技術を統合するのが Industrie4.0 のコンセプトであり、ドイツの強みである機械、設備に関する技術とシステム開発や埋め込みソフト開発の能力を活かし、生産のデジタル化でスマートファクトリを実現しようというもの。狭義には、この強みを活かし、新しい世代

¹³ Software Platform Embedded Systems 2020(2009-2012)

¹⁴ Innovation alliance digital products memories(2008-2011)

¹⁵ NextGenerationMedia – New Technology & Ubiquitas Computing (2007-2011)

¹⁶ AUTONOMIK: 自律的なシミュレーションシステムに基づいたシステム (2011- 2013)

のものづくりを先導するための施策を Industrie4.0 と呼んでいる。しかし現在は、情報系、製造系、通信系、輸送、材料などさまざまな産業分野や、大学、研究機関および連邦・州政府や欧州の一部へとコンセプトが広がり、加担者が増えてきていることから単なる政策の枠を超え、新たな製造業のコンセプトとして定義する場合もある。

「次世代の製造業への変換のためにはドイツはデュアル戦略を追求していく」と、研究連盟とドイツ工学アカデミーによる実施勧告提言¹⁷⁾に記述されている。デュアル戦略とは、1つにドイツの機械、設備産業が今後も世界市場で主導的な地位を維持するために、情報通信技術と伝統的な製造業を帰結的に統合し、知識集約的な技術のサプライヤーになること。一方で、サイバーフィジカルシステム(CPS)¹⁸⁾技術を生産現場にいち早く実現して高効率な生産を行い、生産拠点としてのドイツを確固たるものとして自動車を始めとした製品を世界に向けて輸出していくことの2つを同時に達成するものである。

主導的な生産技術提供者としての視点では、世界第三位の機械輸出力と、情報工学、ソフトウェア開発力を連携させることで、革新的な飛躍が可能であるとしている。これらを実現するためには、既に存在する技術とCPSを組み合わせ、改良を行い、自動化技術やシステム最適化における革新を推進し、新しい時代の価値創造ネットワークに向けたビジネスモデルを作り出し、製品とサービスを結び付けること、を目標とする。

生産拠点としての成功の鍵は、複数の製造拠点や工場内の各部門をネットワーク化し、企業の境界を越えた協力体制を構築することであるとしている。さらに、生産だけではなく、デザイン、部品や素材の調達、プログラム、輸送、メンテナンスまで価値創造ネットワークや製品ライフサイクル(PLC)までを網羅した、論理的で一貫したデジタル化が必須である。新規に形成される価値創造ネットワークに、今日すでに地球規模で活躍しているグローバル企業とドイツ国内でニッチな市場を支えている中小企業を統合することが、産業構造にバランスをもたらし、ものづくり国家としての本質的な強さにつながっていくとしている。

2.3 推進体制

Industrie4.0 の推進のため、Industir4.0 プラットフォームという産学官の戦略策定委員会が組織され、2013年4月に発足した。本部をフランクフルト置き、事務局を産業系3団体(BITOKOM、VDMA、ZVEI¹⁹⁾)が務めている。事務局では、8つの優先開発分野を特定、ワーキンググループ(WG)を設定し研究開発のロードマップ作成を行っている。

- ① 情報ネットワークの標準化と参照アーキテクチャ
- ② 複雑なシステムの管理
- ③ 広域ブロードバンドインフラ
- ④ ネットワークセキュリティ

¹⁷⁾ Industrie4.0 実施勧告提言

http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report_Industrie_4.0_accessible.pdf

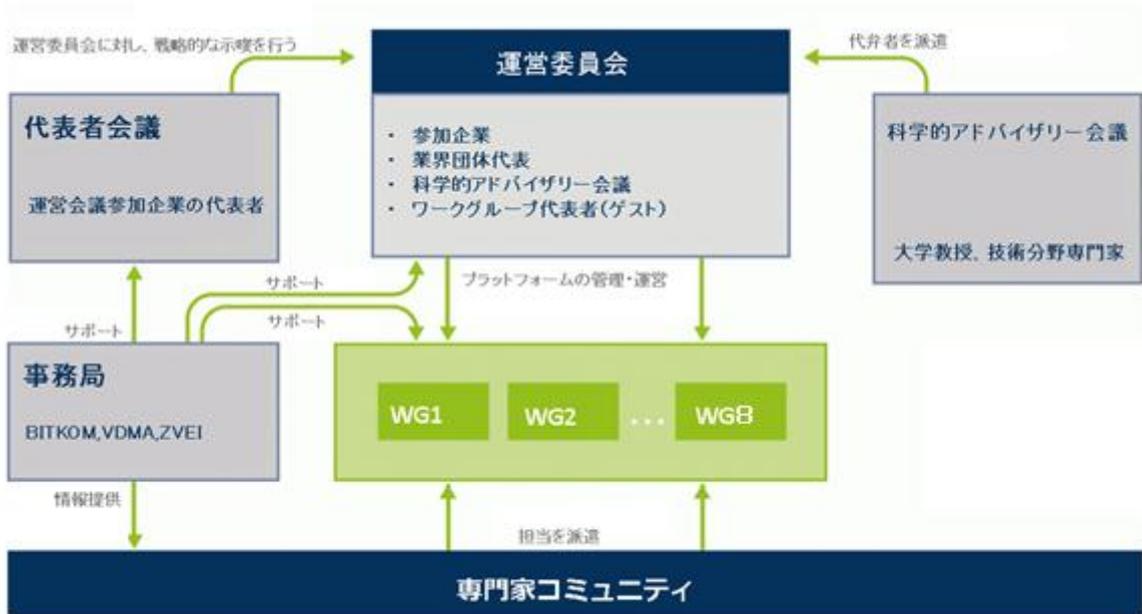
¹⁸⁾ バーチャル名情報と物理的な実世界を結びつけ、モノとモノのコミュニケーションや相互作用を可能にするネットワークを構築するテクノロジー

¹⁹⁾ ドイツ IT・通信・ニューメディア産業連合会 (BITOKOM)、ドイツ機械工業連盟 (VDMA)、ドイツ電気・電子工業連盟 (ZVEI)

- ⑤ デジタル産業時代の労働組織と働き方
- ⑥ 人材育成と継続的な専門教育
- ⑦ 法的な基本条件、規制
- ⑧ 資源の効率的な利用

この中で、①の情報ネットワークの標準化と参照アーキテクチャ WG から、2014 年 4 月にロードマップが発表されている。プラットフォームの組織は下図のようになっている。

図表 3: Industir4.0 プラットフォーム体制図



出典： Industrie4.0 プラットフォーム実施勧告提言書 2013 より

プラットフォームの中心になるのは運営委員会で、戦略策定や作業の進捗確認を行う。代表者会議および科学的アドバイザー会議は、それぞれの専門的な知識や戦略的な助言を行っている。運営委員会のメンバーは次の表の通りである。

Industir4.0 プラットフォーム運営委員会 メンバー表

企業・団体名	業界	役職	氏名
ABB AG	重電	研究開発部長	Christoph Winterhalter
Hewlett Packard GmbH	コンピューター	事業開発担当	Johannes Diemer
Bosch Rexroth AG	産業機械	Industrie4.0 担当	Olaf Klemnd
IBM Deutschland GmbH	ソフトウェア	ソフトウェア営業部長	Friedrich Vollmar
Deutsche Telekom AG	通信	広報部長	Thomas Schiemann

Infineon Technologies AG	半導体	副社長	Dr. Thomas Kaufmann
FESTO AG & Co. KG	産業機械	メカトロニクス部長	Bernd Kärcher
PHOENIX CONTACT Electronics GmbH	電子モジュール	システム部長	Hans-Jürgen Koch
TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH	産業機械	システム開発部長	Klaus Bauer
WITTENSTEIN AG	産業機械	副社長	Dr. Bernd Schimpf
Robert Bosch Industrietreuhand KG	自動車部品	副社長	Dr. Siegfried Dais
SAP Deutschland AG & Co. KG	ソフトウェア	製造・自動車部門	Dr. Daniel Holz
Siemens AG	産業機械	研究開発部長	Dr. Wolfgang Heuring
ThyssenKrupp AG	鉄鋼・工業製品	技術開発部長	Dr.-Ing. Reinhold Achatz
VDMA	産業団体		Rainer Glatz
BITKOM	産業団体		Wolfgang Dorst
ZVEI	産業団体		Dr. Bernhard Diegner
Technische Universität Darmstadt	大学	教授	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl

このメンバー構成からも推察できる通り、自動車産業や消費財メーカーではなく、システムインテグレータ、重電、機械産業などから推進企業が集められ、スマート工場実現に向けた戦略づくりを実施している。

2.4 重点課題

Industrie4.0 の推進において、対象とする技術分野は次の図の通り。とりわけ、組み込みシステムCPSとスマートファクトリの2分野の研究開発が優先されており、上記の各プロジェクトでは、この分野のイノベーションが期待されている。

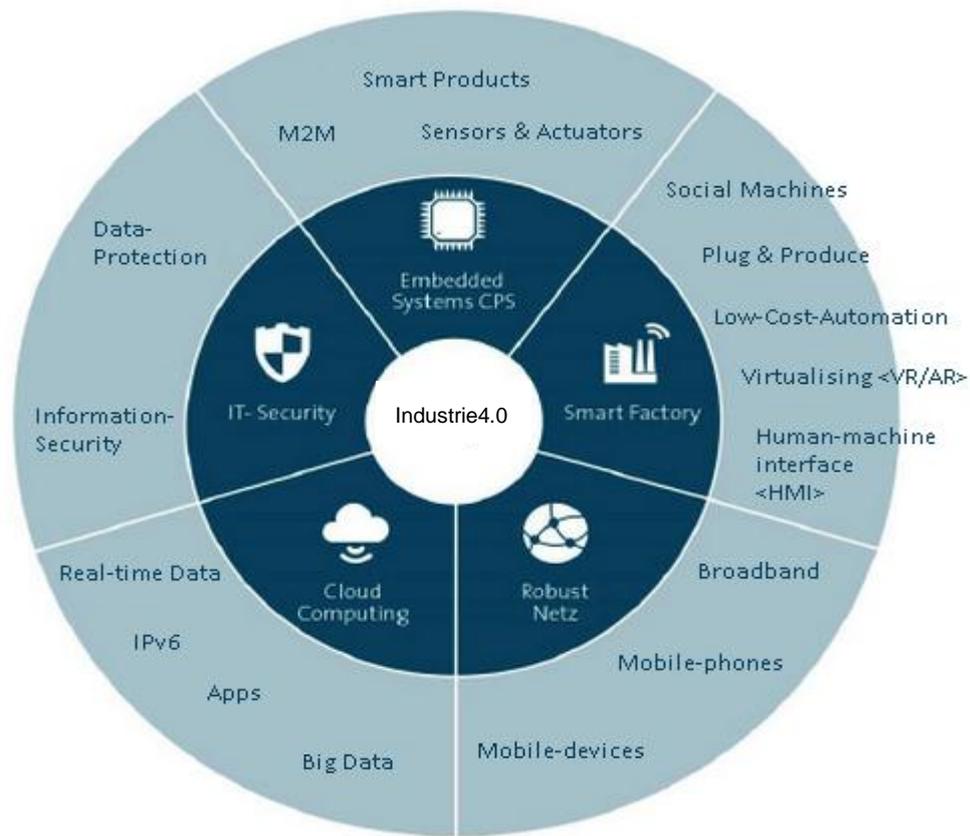
CPS は既に自動車のナビゲーションシステムなどで実用化されている。ネットワークに接続されたナビゲーションソフトウェアによってリアルな道路状況からモバイルデータトラフィックの渋滞情報を用いて、走行をアシストするルート案内をする技術などだ。他の例としては、航空電子工学や鉄道技術の分野での運行支援や交通管制システムに応用されている。これを生産の現場で実現しようというのが Industrie4.0 の主要テーマの一つである。工場における CPS の実装はビジネスモデルや競争のバランスを破壊的に変える可能性を持っているとし、CPS に基づいた新しいサービスの提供は、革命的なアプリケーション、新たなバリューチェーンを作り出し、自動車、エネルギーや機械

などのドイツの強みである産業の大変革をもたらすと考えられている。CPS の技術的な要件は、モバイルインターネット・アクセスとアクセシビリティ。自律的な生産システムを結合するためのネットワークと、最適なセンサーや高度なアクチュエータ技術の革新のために研究開発がなされている。

CPS と両輪を為すのがスマートファクトリ領域の研究である。操作性、機器のインターフェースを改善し、人と機械のインターフェースに関する技術、機械と機械が自律的に強調し特別なプログラムを必要としない連携を可能にする技術（Plug&Produce）の研究推進である。

この 2 領域以外は Industrie4.0 のインフラストラクチャという考え方で、多くのプログラム、プロジェクトは組み込みシステムとスマートファクトリの研究に集中している。

図表 4: Industrie4.0 研究開発領域



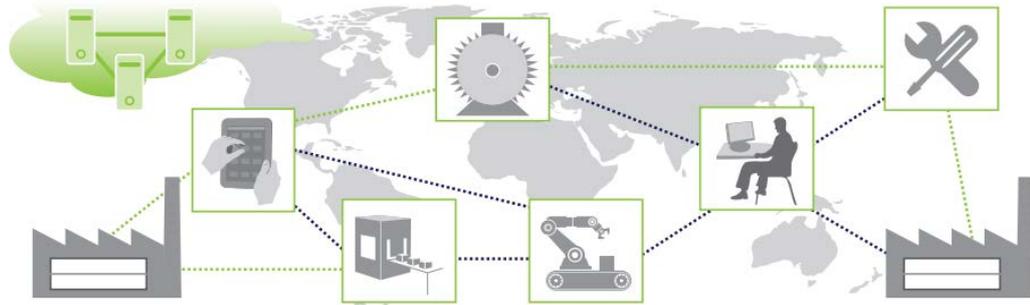
出典： Fraunhofer IAO / BITKOM

これら個別の技術開発の他、政府や関連団体が特に力を入れて取り組んでいる分野や研究課題を以下に示す。

(1) 水平方向の統合をベースとする価値創造ネットワークの構築

スマートファクトリにおいては、人間、機械、資源が社会ネットワークにおけるように、知識を相互に有する。スマートファクトリで生産されたスマートプロダクトは、いつ製造されて、どのようなパラメータで自分を加工し、どこに納入すべきかなど能動的に製造プロセスを支援する。デザインからメンテナンスに至る様々な生産のリソースにおいて、材料、エネルギー、情報の流れを IT でつなぎ、立案システム、制御システムを含むことである。

図表 5: バリューチェーンの水平方向の統合

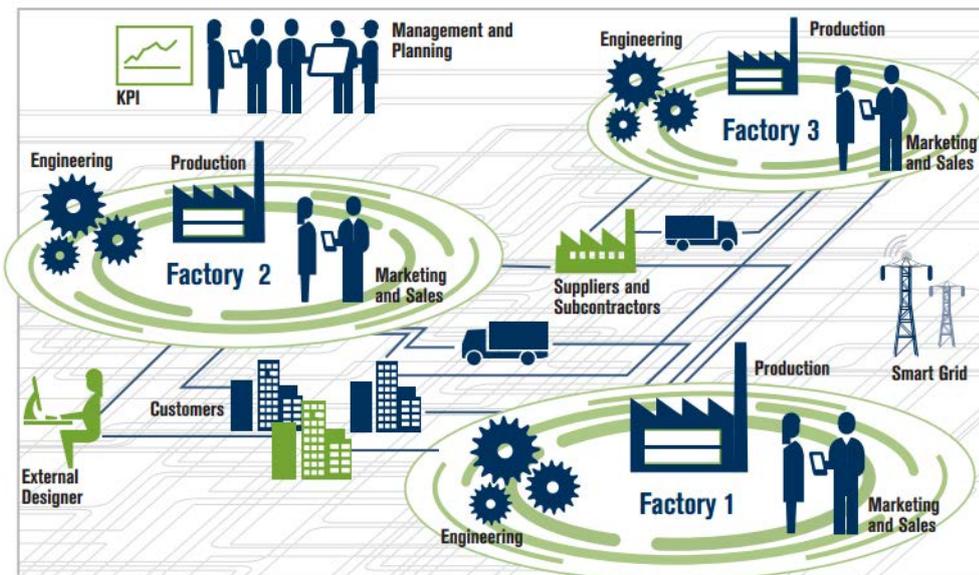


出典: Industrie4.0 プラットフォーム実施勧告提言書 2013 より

(2) 生産システムの一貫したデジタル化

スマートファクトリは将来的に単体で存在するのではなく、スマートモビリティ、スマートロジスティック、スマートグリッド、スマートシティと、未来の統合型インフラの重要な構成要素と成る。

図表 6: つながる工場のイメージ

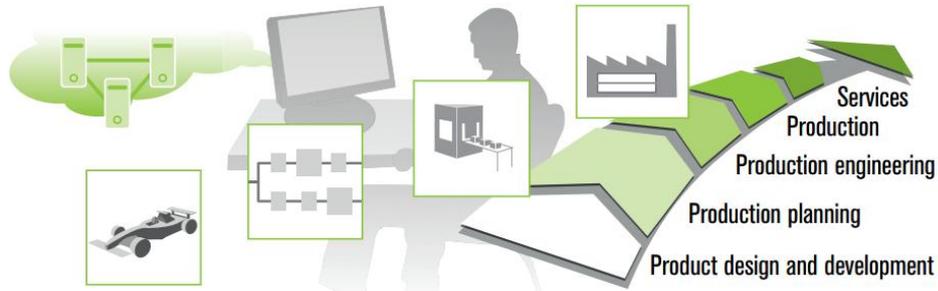


出典: Industrie4.0 プラットフォーム実施勧告提言書 2013 より

(3) 工場内、企業内の垂直方向における柔軟なシステム構築

企業内の、能動者レベル、受容者レベル、制御レベル、生産指導レベル、企業マネジメントレベルにおける各段階の多様な IT システムを統合することを指す。

図表 7: 生産段階における垂直方向の統合



出典: Industrie4.0 プラットフォーム実施勧告提言書 2013 より

2.5 横断的課題

(1) 標準化

Industrie4.0 プラットフォームの WG1は、「情報ネットワークの標準化と参照アーキテクチャ」に関する取組を担当している。工場内の通信規格の標準化を急ぎ、生産工程で異なる機械を繋ぐ際の無駄を排除することが目的である。その狙いの一つは、国際競争に打ち勝つための Industrie4.0 というチームにドイツ国内の中小企業が参加しやすい条件を整えることであるといえる。工場の設備や、人材の確保にあたっては、次世代＝つまり現時点で存在しない製造方法に先行的に投資するにはリスクが大きい。国内の総企業数の 95%以上を占める中小企業を呼び込み、参加を促すためには、規格の統一が急務である。また、今後ドイツの次世代ものづくりのコンセプトを EU 各国に拡大していくためにも、標準を作っておくという戦略は重要であり、ドイツがイニシアティブをとる形で、自動化技術の標準化に向けて、2014 年 7 月に国際電気標準会議 (IEC)²⁰に、Industrie4.0 の戦略グループを設置するなどしている。ドイツ電気技術委員会 (DKE)²¹が 2013 年末にロードマップ Ver.1.0を発表した。国際標準 (IEC、ISO)、欧州標準 (CENELEC) との連携を重視国内業界団体の専門知識を生かし、積極的に国際標準団体へ働きかけるとし、システム関連の手順と領域をまたがるコンセプトに重点を置いている。

標準化テーマ領域	
1	System architecture
2	Use Cases
3	Fundamentals
4	Non-functional properties
5	Reference models of the technical systems and process

²⁰ 国際電気標準会議 (IEC) <http://www.iec.ch/>

²¹ ドイツ電気技術委員会 (DKE) <http://www.vde.com/en/>

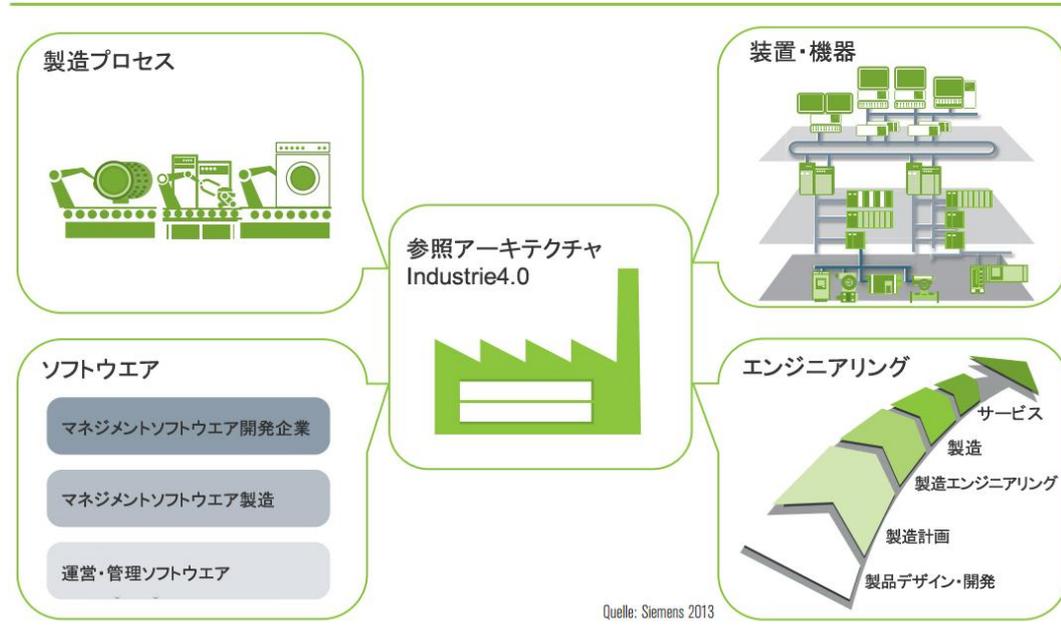
6	Reference models of the instrumentation and control functions
7	Reference models of the technical and organizational process
8	Reference models of the functions and roles of human beings in Industrie4.0
9	Development
10	Engineering
11	Standard libraries
12	Technologies and solutions

出典：ドイツ電気技術委員会 (DKE) ロードマップ Ver.1.0 (2013 年)

このほか、DKE はドイツ標準協会 (DIN) と協力して、情報技術にと電気工学分野について調整委員会を設置し、協力して標準化を進めている。

一方、参照アーキテクチャとは、工場内の製造プロセスの統合、装置や機器の連携、デザインからサービスに至る各レベルのエンジニアリング (プロダクトライフサイクルマネジメント: PLM) における互換性、マネジメントと工場管理のシステムのインテグレーションを指す。技術的な表現や実用段階の規則を総称して参照アーキテクチャと呼び、ソフトウェアおよび関連するサービスに搭載し利用可能とするものを示す。

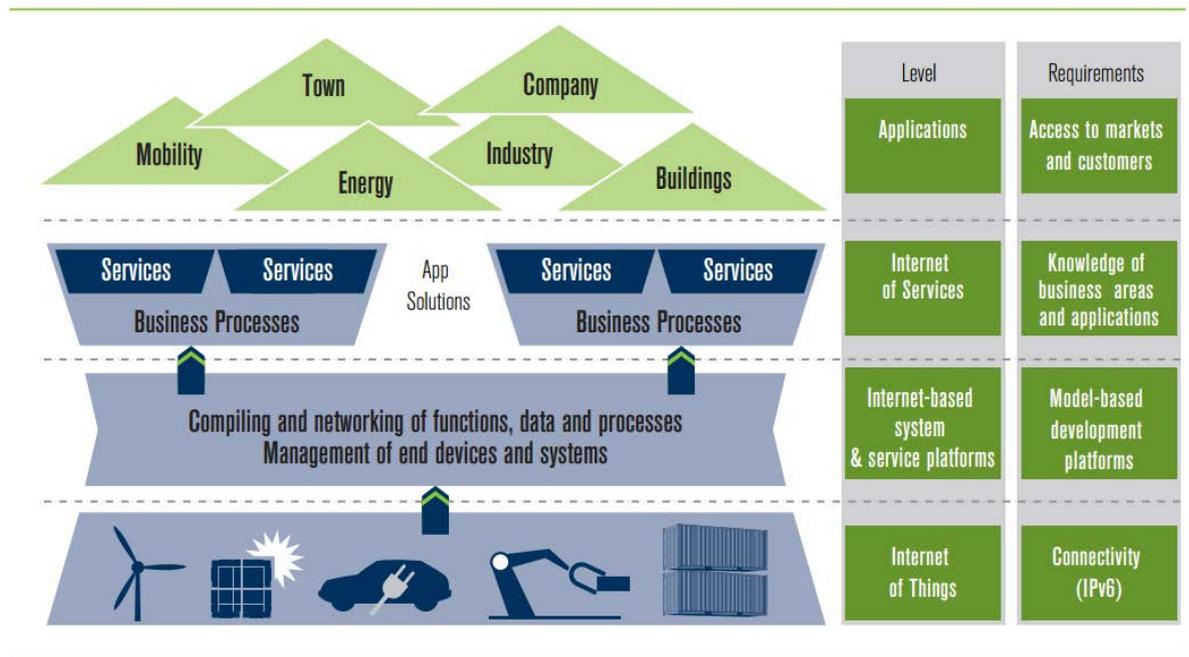
図表 8: 参照アーキテクチャ概念図



出典： Industrie4.0 プラットフォーム実施勧告提言書 2013 より

なかでも、工場でのマネジメントと運営管理ソフトウェアの統合は、現在隣り合うレベルでしか相互の対話不可能でピラミッド型の生産でしかないものが、分散型で複雑な情報の交換が可能になるものとして実現が急がれている。

図表 9: 階層別参照モデル



出典： Industrie4.0 プラットフォーム実施勧告提言書 2013 より

(2) 複雑なシステムのモデル化

先述の Industrie4.0 プラットフォームが出した実施勧告提言には、製品とその生産システムは、機能の追加、製品のオリジナル性、供給における流動性の増加、組織の統廃合の増加、企業間の連携進化に伴って複雑化していると記されている。増加した複雑性を管理する手段としてモデル化を Industrie4.0 の重要要素として位置付けている。モデル化によるシミュレーションで、生産現場でのエラーの早期発見、要件の早期検証、対策の向上によってリスクの軽減が可能になる。設計者の知識によって構築された計画と、現実世界の因果関係と現象を示すリアルな情報をすり合わせることで技術の効率改善を図るのである。同提言に示された応用例では、次々に起こるプロセスシミュレーションを行うことで、生産に必要なサプライヤーの代替を分析選定し、シームレスな生産を可能にできることが挙げられる。例えば予測もできない環境要件や世界情勢の変化(不可抗力)によって、生産現場では短期的に何度もサプライヤーの交代が起こっている。Industrie4.0 が実現すると、こうした事象をシミュレーションすることにより克服し、生産の停止を防ぐことが期待される。実際に、ドイツのソフトウェア開発企業では類似のシステムを開発し、販売を開始しており、高性能のソフトウェアによる生産現場改善が現実段階にきている。

(3) 安全とセキュリティ

製品と生産技術にとって、2 つの安全の観点が重要である。人や環境に危険が及ぶことなく(安全性: Safety)、設備や製品自体、特にそれに含まれるデータや知的所有権を、悪用や無断アクセスから防護しなければならない(セキュリティ: Security)。安全性の問題はこれまで、生産技術設備の設置やその製品では重要で、この種のシステムの製造・運用に関する多くの規格

や標準によって規制されている。1960年代末に機械や電子機器に情報技術が最初に導入されてから、生産において安全要件は一段と高まってきた。安全性の要素である機能安全性の検証がますます複雑化する一方で、徐々にセキュリティも問題として認知されるようになった。しかし、セキュリティの実現は進捗が遅く、わずかに一部が解決されているにすぎない。Industrie4.0ではCPSに依拠した生産システムが、高度なネットワークのコンポーネントとなりリアルタイムに情報交換が実施されると期待されている。従って、次のセキュリティ対策が成功した場合に限りIndustrie4.0の達成が可能である。

- ◆ 設計段階からのセキュリティ機能の実装
- ◆ 生産プロセス全体安全の確保

極めて重要なのは、第一に、システムが正確に機能することにより担保される機能安全性が、さまざまなセキュリティ対策(暗号法又は認証法)影響で、上手く動かなくなる問題の解決である。さらに、その逆の影響として、特定のシステムのために構築された安全上重要な機能がシステム全体の安全性を脅かすことを防ぐことである。

(4)人材育成と労働

Industrie4.0では、生産リソースとプロセスを状況に応じて制御、調整する能力が労働者に求められる。労働者は、トラブル処理や煩雑なルーチンワークから免除されることで、創造的で価値創出のための労働に集中できるようになるとされている。さらに、労働内容や条件が柔軟になることで、人材の流動性やより個人に合った職の確保が期待されている。ただし、新たな仮想作業環境の要件は、作業能力の維持と確保の危険も包含している。技術的統合が進むほど、柔軟性を要求され、仮想と経験世界との間の緊張が高まり、広がることが予想される。作業プロセスの電子化/仮想化が進んで、行動能力の喪失、自己行為からの離脱経験が生じるかもしれない。このような関係の中では、職場組織、継続教育活動、技術/ソフトウェア・アーキテクチャが相互に調整され、「一体で」集中して展開される社会技術的設計がなされる必要があるとしている。

ITの専門資格も、Industrie4.0によって根本的に変化することが予測される。想定される応用領域の多様性から、教育の標準化には限界がある。デジタル経済の要件を教育に取り入れるには、製造産業との対話がますます重要で、企業と大学が密接な関係を築いていかなければならない。自然科学とエンジニアリングだけでなく、マネジメントやプロジェクト管理のような広範な専門知識にさらに取り組むことも必要との認識である。

2.6 ロードマップ

未来プロジェクト Industrie4.0 は 2020 年から 2025 年ぐらいに実現することを目標に実施されている。BMBF が出した、「”Industrie4.0”将来像²²」によると、Industrie4.0 が計画通り実施され、生産のデジタル化が進めば、2025 年には中国、米国を抜いて、輸出世界一になっていると書かれている。2014 年 4 月に Industrie4.0 プラットフォームが出した、それぞれの研究領域に関する白書²³によると、前項の 3 要素の実現に向けたタイムフレームを設定している。

図表 10: Industrie.4.0 実現に向けたロードマップ



出典: Industrie4.0 プラットフォーム Whitepaper2014 より

2.7 期待される成果

(1) 製造業にあたる影響

前章で述べた様々な課題を克服し、基盤となる技術の研究開発が段階的ではなるが、順調に進んだという前提で、2025 年ドイツ製造業は以下の目標を達成できるとされている²⁴。

■ 個別化生産

低コストで消費者個別のリクエストに応えられる環境が整備される。このためには、生産プロセスの標準化、モジュール化、デジタル化、ネットワーク化および自動化が 5 つの鍵

²² http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf (2012 年/ドイツ語)

²³ Industrie4.0 Whitepaper FuE Themen (2014 年/ドイツ語)

http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Whitepaper_Forschung%20Stand%203.%20April%202014_0.pdf

²⁴ http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf (2012 年/ドイツ語)

である。個別化生産では、工場や生産拠点の分散および 1 つの機械や設備で多様な生産が可能となる。センサーによってリアルタイムにデータを捉え、物理的な生産や物流のプロセスに対応し、デジタルネットワークによって相互につながるサービスである CPS によって低コストで個別化生産が実現し、多くの産業分野に応用できるとしている。

■ 省資源

工業国では、生産部門が電気エネルギーの大手消費者である。コストに直接的に影響することから、産業界は消費を抑えたり、代替策を講じたり、様々な努力を行っている。とりわけ、原材料を含むエネルギー資源管理が最重要課題となる。CPS による工場の管理によって、生産プロセスと機械、設備の稼働を効率化することが可能になる。例えば、工場は週末などに休止している間も速やかな生産再開のために電源が入った状態になっており、エネルギー全消費量の 12%に上っている。こうした状態をスマート工場では克服できるようになる。また、不良品の防止や設備故障の回避も材料やエネルギー消費低減になる。

■ 労働の高度化

自律的に学ぶ機械、考える工場によって労働者の作業は容易に効率的になる。また、熟練した高齢の労働者を補助する機能を備えることで、彼らのノウハウを長期にわたり工場に備えることが可能になる。企業内では機械だけでなく人のつながりも密になり、情報交換や知識の共有が可能となる。生産の拠点が分散化するのに伴い、高度技術者を複数の工場でシェアすることも現実のものとなる。

(2) 社会、経済にあたえる影響

■ 中小起業支援 - 技術移転と人材育成

参照アーキテクチャ、レポジトリ、モジュール化したコンポーネントによって相互運用の可能性や、システムの互換性が高まることで魅力的なビジネスエコシステムの構築が可能となる。複数の工場が企業の枠を超えてネットワーク化されることで、真にオープンで公平なイノベーションが期待される。また、迅速なイノベーションの実現にはアイデアから市場投入まで一貫して行うことが求められ、さらに産学連携の重要性が増す。生産現場からのフィードバックがリアルタイムになり、また研究の場が生産に近いところで行われる中で、若い労働力、高度な技術者の育成も同時に行える環境が創出される。

■ 国際競争力の強化

国内の産業で国際競争力のある分野をさらに伸ばす、ことはハイテク戦略の主要な目標である。総輸出額の 60%が製造業であるという事実から、ドイツが製造業の国際競争力を強化したいと考えているのは想像に難くない。Industrie4.0 によって、省資源で、高付加価値の製品を作ることが可能になれば自ずと製造業の国際競争力は高まる。また、世界の生産技術とプロセスをドイツの標準で占めることができれば、長期的にドイツの技術

に対する依存度を高めることができる。現在はスマートファクトリに限定した研究開発だが、今後バリューチェーンの設計からリサイクルまで **Industrie4.0** のコンセプトを広げることができれば、さらにドイツの競争力は増すことが考えられる。

3. Industrie4.0 で実施されている代表的なプロジェクト

ハイテク戦略では、イノベーション創出のために産学の共同研究開発、複数の企業が参加するコンソーシアムなどのモデルが推進されている。Industrie4.0の実現には、製造、機械工業、情報工学、法学、経営学、社会学など、幅広い領域の専門家の意見を取り入れ、プラットフォームの8つの各作業部会では、各々が包括的な研究開発ロードマップ策定を行っている。Industrie4.0コミュニティにおいて、活発な議論と情報交換が行われ様々なプロジェクトおよび関連するサブプロジェクトが実施されている。

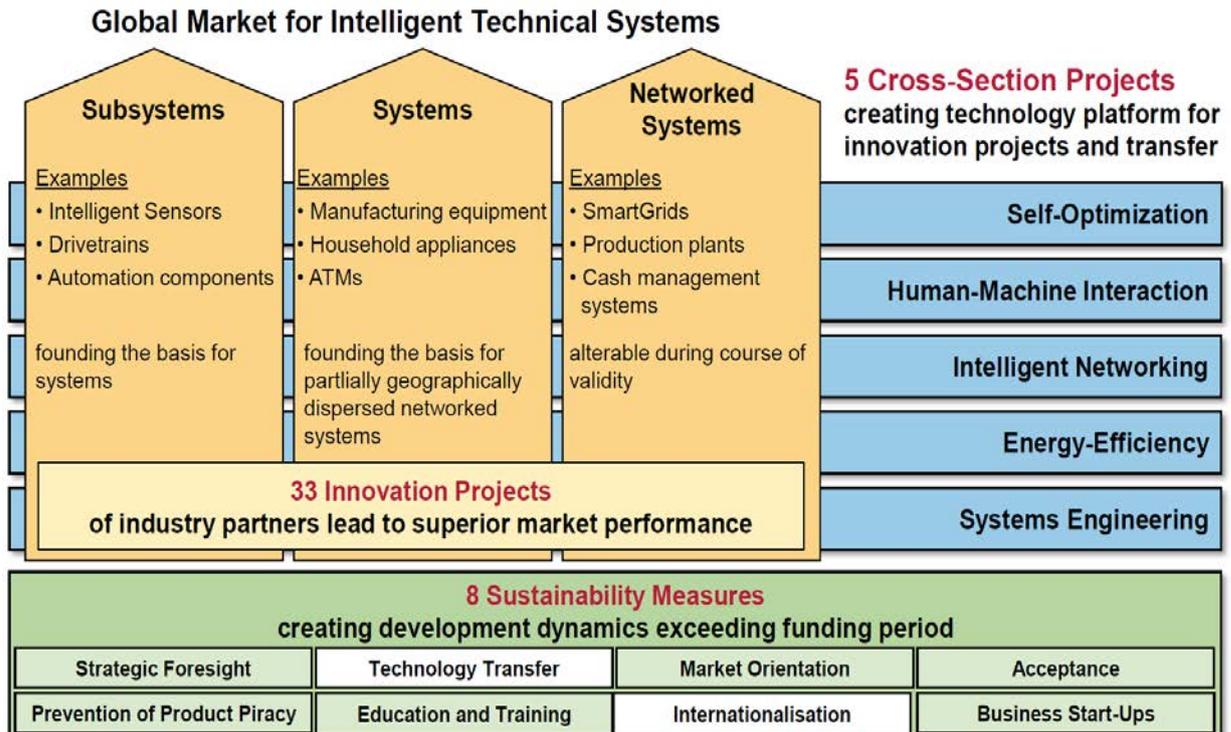
(1) 先端クラスター競争プログラム²⁵ it's OWL

連邦政府のクラスタープログラム「先端クラスター競争²⁶」に採択されたのが、ノルトライン・ヴェストファーレン(NRW)州パダーボルン市の it's OWL (Intelligent Technical Systems Ost-Westfalen Lippe)である。主な研究のテーマは、「考える工場」スマートファクトリのモデル運用、Plug and Produce でまさに Industrie4.0の研究開発領域と重なっている。基礎的な研究開発の中心になっているのは、同地域にあるパダーボルン大学、オストヴェストファーレンリッペ大学、ビーレフェルド大学、フラウンホーファー研究センターなど17の大学、研究機関である。地元の参加企業は2種類あって、第一グループは研究資金を出資し、実際の開発コンソーシアムを構成する企業(22社)、第二グループは賛助会員の的に会費を納め、技術移転プロジェクトに参加している主に中小企業(約80社)である。5つの基礎的な横断プロジェクトは、自動化技術、ヒューマンマシンインターフェース(HMI)、スマートネットワーク、資源の高効率化、システムエンジニアリングの研究を行っている。企業による前競争的なプロジェクト(イノベーションプロジェクト)では、それぞれの企業が属する産業分野でのテーマ毎に、実際の生産現場に近いところで研究開発が実施されている。

²⁵ <http://www.bmbf.de/en/20741.php>

²⁶ ハイテク戦略下、産学連携の最重要政策である先端クラスター競争プログラム。2007年から3回にわたる採択ラウンドで合計15のクラスターが選定された。国際的な競争力をもつ産業分野を育成し、イノベーションを創出することを目標に、分野の指定なく選ばれている。助成期間は5年間で、助成額は連邦政府から計4千万ユーロ(5年間)、参加している企業から同額以上の出資を必要としたマッチングファンド。主管はBMBF。

図表 11: It's OWL プロジェクト構成



出典: it's OWL Mr. Korder プレゼン資料より

(2) 次世代生産技術研究 (Forschung für Produktion von morgen)²⁷

1995 年から 1999 年に実施された助成プログラム Produktion2000 の成果に上乗せする形で計画されたのが次世代生産技術研究で、BMBF が主管している。次の 4 項目をテーマに様々なプロジェクトが進行している。

- ◆ 市場動向の調査と戦略的な生産計画
- ◆ 製造技術と設備
- ◆ 製造業における新しい企業間協力の体系
- ◆ 人間と企業の改革への適応性

一部 2012 年から、多くが 2013 年からスタートしたマッチングファンドで、4 年間総額 7,800 万ユーロのプログラム(内、BMBF の助成額は 4,300 万ユーロ)となっており、2016 年まで 17 のプロジェクトが実施される。

(3) 産業ロボット・M2M 研究 (Autonomik für Industrie) 4.0²⁸

Autonomik は BMWi 主管の製造技術の研究開発プロジェクトで、2010 年から 2013 年まで実施された、主に中小企業を対象にした「Autonomik 自律的なシミュレーションシステムに基づいたシステム²⁹」の後継プロジェクト。2014 年にスタートした第二弾は、14 のコンソーシアムが構築され、より実践に近いテーマで研究開発が行われる。助成額は、3 年間で 1 件当たり 4,000 万ユ

²⁷ http://www.produktionsforschung.de/UCM01_000370 (ドイツ語)

²⁸ <http://www.autonomik40.de/> (ドイツ語)

²⁹ <http://www.autonomik.de/en/index.php>

ーロが BMWi から支払われる。このプログラムもコンソーシアムに参加する企業の負担も義務付けられており、25%-50%の資金が産業界から拠出される。主なプロジェクトとしては、ロボットオペレーティングシステム (ROS) の研究開発で自動車メーカーの BMW AG が参加している”ReApp”や、工場内移動手段の研究で、運転手不要の移動車両、”FTF out of the box” などがある。

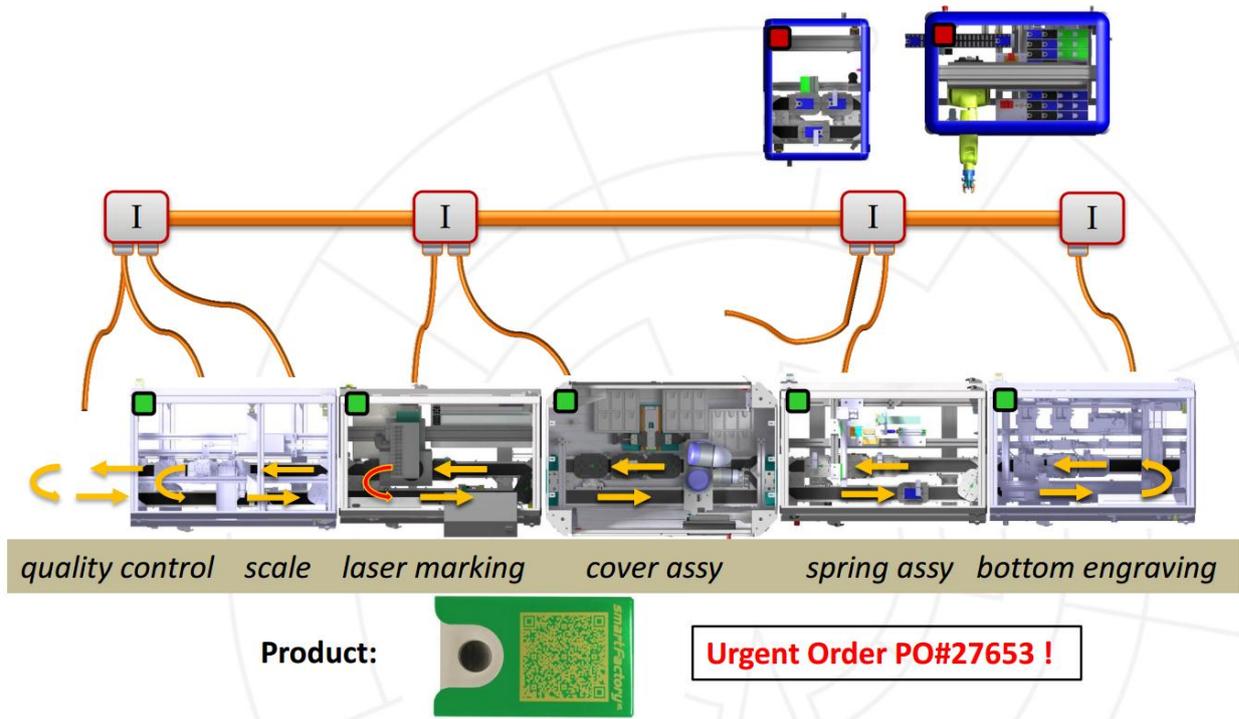
(4) スマートファクトリ パイロット工場 (Smart Factory KL)³⁰

2005 年に技術イニシアティブとしてドイツ西部の都市、カイザースラウテルン (KL) に設立されたスマートファクトリ KL は、生産ラインの自動化と通信技術の統合を目指し研究開発を行う、欧州唯一の特定の企業に依存しないデモ工場である。創立に携わった企業および研究機関は、BASF 社、ドイツ人工知能研究センター、KSB 社、ペッパール+フックス社、プロミネント社、カイザースラウテルン工科大学とジーメンス社である。2012 年からは、Industrie4.0 の取組開始を受けて、未来のスマートファクトリ実現に向けた技術移転と実践的な研究を核に様々な実証プロジェクトを行っている。運用は、会員企業の出資、連邦、州政府の助成、スポンサー企業の拠出に依っている。

複数の工作機械メーカーの生産モジュールや異なるプログラム言語で構築されたシステムを統合して、シームレスな生産を行う、という研究が中心となっている。Industrie4.0 で推奨されている優先技術と多くがオーバーラップすることや、Industrie4.0 にプラットフォームに参加している企業が、スマートファクトリ KL にも名を連ねていることで、両者の取組には重なる部分が多い。特徴的なのは、スマートファクトリ KL で生み出された新たな技術や特許などは、会員企業にオープンにされており、中小企業の参加を促す意味でも非常に大きな貢献をしている。

³⁰ <http://www.smartfactory-kl.de/>

図表 12: スマートファクトリ 異なるメーカーの機械を連結して生産するデモ機概念図



出典: Smartfactory-KL Prof. Zühlke プレゼン資料より

4. まとめ・考察

果たしてドイツの Industrie4.0 は成功するのだろうか？

2011年にスタートしたアクションプランとしての Industrie4.0 は今のところ上手く進捗しているといえる。その理由は、第一に産学官が一体となって取り組む、「ドイツ株式会社」的な雰囲気兼ね備えていることだ。政府は、標準化への準備や中小企業の研究開発支援などイノベーション環境の整備を担い、産業界は生産の効率化、低コスト化に向けて研究開発投資積極的に行っている。アカデミアも工科大学や専門大学を中心に様々な国家プロジェクトに参加し、基盤的な技術への貢献をしている。ドイツの公的研究機関で、応用研究に特化したフラウンホーファー応用研究促進協会 (FhG)³¹が、産業界とアカデミアの橋渡し機関として機能している。さらに、ドイツでは労働組合³²が Industrie4.0 に賛成の立場を取っており、文字通りドイツという国が一企業であるかのように展開している。第二に、同政策は明確なビジョンをもっていることが上げられる。市場のリーダーとして競争力のある産業拠点として付加価値の高い製品をドイツで生産し輸出すること、主導的サプライヤーとして工作機械と必要なモジュールを輸出し、世界の工場の製造技術を主導する 2 段の戦略を示していることだ。2025 年頃を目標に遠すぎず近すぎない展望で、産業界のやる気を引き出していると言える。第三に、やはり製造業の底力があることである。隠れたチャンピオンとして知られる、ニッチトップが多いドイツの創造的中小企業³³がドイツの経済を牽引している。研究開発費の絶対額が多い世界の上場企業 1,000 社の研究開発投資は平均して売上高の 3.6%である一方、ドイツの隠れたチャンピオンは、売上高の 5.9%を研究開発に費やしているという。こうしたイノベティブな中小企業がドイツには 2,000 社あまりあると言われている³⁴。また、自動車などの消費財に比べあまり知名度はないが、ドイツはソフトウェアの開発でも世界的に強く、組み込みシステムでは米国、日本について世界第 3 位である。特に産業向け組み込みシステムのシェアはさらに高い³⁵。従来型のものづくりとソフトウェアの開発の両方の能力を兼ね備えたドイツは、モノとサービスのインターネットの世界で一歩先を行っていると言っても過言ではない。第四に、人間の働き方が Industrie4.0 によってどう変わるかという議論が、基盤技術の研究開発と同時並行で行われていることである。ここに、ドイツ社会に大きな影響力を持つ労働組合が Industrie4.0 の推進に賛成している理由がある。労働力も重要な資源ととらえ、この資源を省くだけでなく合理的に用い、またその役割をさらに進化させるという理念である。最後に、EU の存在も大きい。2014 年時点では、あまりドイツと EU の製造業に関する政策やファンディングに連携は見られないが、ドイツが標準化を急ぐのも EU の市場が念頭にあるからだ。第 7 次研究枠組み計画 (FP7: 2007-2013) では、シーメンス社が主導した IoT@Work では、Plug&Play コンセプトの開発を進めてきたし、総額 24 億ユーロの技術プラットフォーム ARTEMIS に含まれる 8 つのサブプログラムには「オートメーションによる製造・生産」および「サイバー/フィジカル/システム」が含まれていた。さらに 12 億ユーロ規模のファンディング、官民パートナーシップ (PPP) でも ICT によるスマート製造分野で毎年プロジェクトを公募している。その中

³¹ フラウンホーファー応用研究促進協会 <http://www.fraunhofer.de/en.html>

³² ドイツ労働総同盟 (DGB)

³³ 中小企業の定義は日本と違い、従業員 500 名未満、売上高 5,000 万ユーロ/年以下の企業を指す。

³⁴ グローバルビジネスの隠れたチャンピオン ハーマン・サイモン著 2009 年

³⁵ National Roadmap Embedded Systems ドイツ電気・電子工業連盟 (ZVEI)

で、SAP 社主導の ActionPlanT プロジェクトがマニュファクチャリング Ver.2.0³⁶を出し、Horizon2020 (2014-2020)における研究推進のたたき台として活用される。

ドイツの強さ:

- ① 産官学の連携 「ドイツ株式会社」
- ② 明確なビジョン デュアル戦略
- ③ ものづくり、ソフトウェア開発の統合と中小企業
- ④ 人間重視 労働の質を上げる
- ⑤ EU に続く道

一方で、2025 年頃のドイツ製造業がどういう姿になっているか、なり得るかという問いに答えるのは容易ではない。技術的な側面からいえば、セキュリティ対策と情報保護がロードマップ通り進むか否かが鍵になると思われる。一つの製品がマーケットで成功すると、常に製品侵害の攻撃にさらされる。世界的な競争の中で、高所得国の知的所有権 (IP) 保護が重要である。簡単に複製できるソフトウェアやコンフィギュレーションでは、企業・製品ノウハウの模倣も増えてきている。Industrie4.0 の場合、価値創造ネットワークでの企業間協力が大幅に増えるので、IP 保護がさらに重要である。技術面でも、企業法、競争法のレベルでも、企業にとって重要な知的所有権を喪失しないで、いかにプラットフォーム内で企業秘密と透明性を保証できるかという問題を解決しなければならない。また、ネットワークのセキュリティ対策も大きな矛盾を含んだ、ユーザーフレンドリーなセキュリティ・ソリューションでなければならないのだ。プロセスとアプリケーションは、一般的にユーザーフレンドリーでなければセキュリティは確保される。しかし、工場内、工場間がネットワークでつながる以上、最初的设计からエンジニアリング、運用・保守に至るまで、ユーザーの要請に合わせ、ユーザーフレンドリーなインターフェースで、アプリケーションの実行を保証するセキュリティ・ソリューションを開発しなければならない。上記のロードマップにあるとおり、標準化の次は IT セキュリティ技術の開発推進の段階になると予想される。このフェーズの進展度合いによって、ドイツ Industrie4.0 の成功の可否は左右されるだろう。

なお、本報告書は速報版であり、平成 26 年度末までに G-TeC 報告書として各国版と併せとりまとめる予定としている。

³⁶ http://cordis.europa.eu/fp7/ict/micro-nanosystems/docs/fof-evaluators/actionplan-vision_en.pdf

1.5 参考資料

- 労働政策研究・研修機構 http://www.jil.go.jp/institute/reports/2004/documents/L-7_03_02.pdf
- EU 統計局 (EUROSTAT)
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
- Industrie4.0 実施勧告提言
http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf
- acatech 提言 Cyber-Physical Systems 2011
http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Stellungnahmen/POSITION_CPS_NEU_WEB_120130_final.pdf
- 連邦教育研究省 Industrie4.0 未来予想図
http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf (2012 年)
- Industrie4.0 Whitepaper FuE Themen (2014 年)
http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Whitepaper_Forschung%20Stand%203.%20April%202014_0.pdf
- Autonomik for Industrie4.0
<http://www.autonomik40.de/>
- Smartfactory KL
<http://www.smartfactory-kl.de/>
- グローバルビジネスの隠れたチャンピオン ハーマン・サイモン著 2009 年
- National Roadmap Embedded Systems ドイツ電気・電子工業連盟 (ZVEI)
- JETRO 日本貿易振興機構
<http://www.jetro.go.jp/indexj.html>
- Handelsblatt
www.handelsblatt.com/