核融合、加速器施設における超伝導・低温設備の

データベース作成と安定運転実績の調査

—国際会議・論文リポジトリ—

佐藤 定男*

Edition of a Database and Investigation on Stable Operation and Experiences of Superconducting and Cryogenic System in Fusion and Accelerator Facilities — a repository from papers at International Conferences —

Sadao SATOH*

1. 研究の経緯

このたび、首題に関する世界の現況把握と集約化を目的に筆者が作成したデータベースを紹介し、読者のアクセスや検索を得て本研究への批判、関心を得たいと思う。

筆者が所属した核融合科学研究所は課題名と同趣旨の国際会議を、1993年に第3回土岐コンファレンス、1996年にNIFSシンポジウムとして主催してきた。同所を退役して十数年を過ぎた現在も、当分野の発展は目覚ましく研究施設も工業的規模に達するに至り、いまや施設の安全性と安定性の実証・確立は運営上の最重点課題である。

本研究は平成22年度、核融合科学研究所から新規委嘱テーマとしての共同研究が承認され、当報告にも述べるように超伝導・低温工学関連の国際会議論文集を底本としてその発展動向をまとめることになったものである¹⁾。

研究の目的は、高精度に限定・特化された情報が低コスト、局外者でも簡便に入手できる個人用データベースを作成することである。本来、データベースとしての網羅性を求めるなら研究論文全文を検索対象として、電子索引や電子司書による検索を多数台のサーバーとネットワークを用いて実行するGoogle方式が一般である。他方、当研究はその対極にあり、個人がPCだけで検索できるコンパクト

さと専門担当者による情報のピンポイント化を指向している。これを図書館方式と呼ぶことにしよう。Google方式が多数利用者を前提として運用経費や検索時間の極小化を計るのに較べて、当データベースはその必要がなく、特定の専門分野に限定され将来データとの連続性にも機動的であり、さらに著作権問題も対応容易である。

このように旧文献のアーカイブズではなく、リポジトリとして最新情報をあつめ共通する工学技術とそれらの安全管理技術を抽出し比較評価するものであるが、これは国際会議と同様に、集約によって研究者や研究機関の間での関心事についての意見交換を活発にするためである。さらに可能であればその成果を当該装置の世界標準化へと発展させることをも遠望している。

調査対象の情報源には国際会議論文集が最適である。すなわち同一ジャンルの情報が逐年次集積され、かつ世界全体にわたって展望できるためである。

対象論文集には、1 Proceedings of International Cryogenic Engineering Conference, 2 Advances in Cryogenic Engineering, 3 IEEE Trans. on Applied Superconductivityを底本とした。そしておおむね過去20年に遡る全てのバックナンバーから該当する論文を採取した。必要な場合、他の学・協会論文も適宜採取した。このためデータベースの使用言語は全て英語となっている。データベースを原論文の著者に提示し、コメントならびに追加情報の提供を受けるということを容易にするためでもある。

データベースは逐年に増補・改訂を加える予定なので、完結形がない。しかし、進め方については手順が整備したため今回これを開示し批判を得たいと考えるものである。

Received October 1, 2014

* 核融合科学研究所名誉教授

〒658-0044 兵庫県神戸市東灘区御影 2-8-36-104

Professor emeritus of National Institute for Fusion Science,
2-8-36-104 Mikage, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo 658-0044,
Japan

† E-mail: satosada@hera.conet.ne.jp

DOI: 10.2221/jcsj.50.137

2. プロファイルカードの作成と検索

2.1 施設概要カード (Profile Card) の説明

ある設備の安全、安定運転の実績を論じるには、施設が目的とする機能に加えてそれらを具現する機器の構成が明らかでなければならない。これらの情報は上記の国際会議報告論文から専門担当者によって撰別・抽出され、施設毎に「概要カード (Profile Card)」として作成される。

また一般と異なり、引用論文は出版年次ではなく、会議の開催年 (報告年) を採用している。

概要カード作成の対象となる施設を選定するには以下の基準をゆるやかに適用する。

1. 冷凍能力 ~ 1 kW @ 4.5 K レベル以上のヘリウム冷凍機を用いた超伝導設備、2. 数年以上に亘り継続して運用された又は運用予定の設備、3. 施設と設備がシステムとして構成されている (メーカー標準の冷凍機は対象外)。

本稿執筆時点 (2014 年 9 月) の収集論文の総数は、上記 1 と 2 で約 1100 件、上記 3 のマグネット関連約 130 件、合計で 1230 件である。

概要カード作成の対象となった施設は 94 を数えている。以下本稿で LHC, TRISTAN などと略記されるものは施設の設置機関、または設備の短縮呼称である。

共同研究など、論文著者の所属機関に当該設備が設置されていない場合も、3 章に述べる「論文リスト」では協力機関として別途に機関登録した。その結果、論文リストの作成数は 150 機関と施設数を 5 割上回った。

概要カード (Profile Card) は施設毎に作成されるが、その後、統合化され Excel 様式のデータベースとして構成される (ファイル名: Directory11.xls)。さらにこれをキーワード検索用の検索ソフト FileMaker Pro にダウンロードして directory9.fp7 として使用される。FileMaker Pro では連続して異なるキーワードで検索を繰り返しても原データ群は、原状態で保管される。ただし訂正追加を加えた後は別バージョンとして新規登録・保存される必要がある。Excel の Directory11.xls はそのバックアップともなる。

概要カードに記載される情報の区分や表記は、キーワード検索結果の網羅性や精度を左右するので、共通性ある、標準的な用語を選択することが重要である。すなわち原論文での区々な表現を簡潔に類型化できる統一用語を用いることが重要であり、単位表示も同様である。

一枚の概要カードでは情報が 6 つに区分される。それらは、1 ID No., 2 device name, institution, facility classification, mission of experiment, operation history, 3 specification of main facility, 4 reference paper(s), 5 address of institution, 6 classification code (大分類: 1=fusion, 2=accelerator, 3=miscellaneous) が記載される。

上記の区分 2、3 について核融合装置の例を示す。

2 LHD, National Inst. of Fusion Science, Japan, Fusion,

heliotron, pulse-less steady plasma, 15 years operation since 1st plasma at March 1998, accumulated operation $> 67,300$ hr (as of 2012)

3 3 T magnetic field at plasma axis, 3.9 m torus radius, 0.5 m minor radius, one pair of aluminum stabilized NbTi composite conduit conductor, one pair of Helical coil, 3 pairs of 18 double pancake NbTi CICC poloidal coils, 0.9 GJ coil stored energy, 850 wT at 4.5-3.8 K cold structure, Refrigerator 9.2 kW@4.4 K, compressor power consumption 2.7 MW。

加速器についても上記同様である。

なお、CERN 研究所の場合は本体の LHC の概要カードの他にも、SC magnet である粒子検出器の ATLAS/CMS カード、SC magnet と SC cavity を用いた前代装置の electron-positron 加速器 LEP カード、同じく beam separator の IRS カード、bubble chamber の BEBC カードが作成された。

建設中、計画中の設備、核融合の ITER や W7-X、加速器の FAIR や ILC などについても概要カードが作成されている。それはリポジトリとして将来収集されるであろう記事データへの連続性を考慮したためである。

2.2 施設検索ツールと検索例

概要カードは個人による管理が目的なので、PC 使用で追加、変更が可能かつ広く普及している検索手段として、前記のごとく、FileMaker Pro を用いた。

次にキーワード検索の実施例を示す。

Table 1 の第 1 行は、超伝導電磁石に蓄積されるエネルギー量を表す単位 MJ または GJ をキーワードに選んで検索した結果で、94 施設の中から 12 設備が抽出された。そのうちプラズマ閉込めに超伝導磁石を用いる核融合が 9 件と最も多く、他は LHC 加速器の検知器や単独の高磁場コイルである。

第 2 行は主に加速器における粒子運動エネルギー (相対論的衝突運動量) の単位 MeV、GeV、TeV を部分キーワード eV によって検索したもので、35 設備が抽出された。この内、核融合施設の一例はプラズマ加熱用の中性粒子入射装置 NBI におけるビームエネルギーである。さらに用語 every、evaluate の ev を eV として検索した 2 例はバグとして除外した。

第 3 行は核融合や加速器に共通するヘリウム低温冷凍設備の能力を検索したもので、冷凍機の 4.4 K レベルでの汲み上げ熱量をキーワード kW を用いて検索した結果であ

Table 1 Number of systems captured by keyword query

Field keyword	Fusion	Accelerator	others	Total
stored energy, MJ, GJ	9	2	1	12
colliding energy, eV	1	34	0	35
refrigerator capacity, kW	14	27	2	43

る。全 94 施設から 43 施設が抽出されたが、このうち 27 例は加速器である。また、そのうち 13 例は超伝導加速空洞用の冷凍機である。同様のことは Table 1 以外の検索キーワード RF、cavity、Hz—での出力 17 例からも裏付けられた。

2.3 核融合施設のプロフィールカード例と解説

Table 2 は Table 1 第 3 行の中の核融合装置分野 14 例から、JET、MITICA などの中性粒子入射装置と EAST と重複する HT-7、HT-7U を除き、5 例の設備仕様をプロフィールカードから抽出し表作成したものである。

表における中・細分類のキーワードについて解説する。磁場閉じ込め核融合炉の磁場配位は、基礎研究用を除く工学実証用では、トカマク TOKAMAK とステラレータ（ヘリオトロン）Stellarator（Heliotron）にほぼ収斂されつつある。何れも、トーラス形成磁束にプラズマ方向の“握じれ”が必要であるが、トカマクではプラズマに生起する自発電流または中心ソレノイド（center solenoid）CS を交番励磁して誘起する誘動電流でプラズマを回転させる。

ヘリオトロンやステラレータは捻れた形状のトーラスコイルを用いる（LHD、W7-X）。後者は CS が不要なので直流コイルでよく、従ってプラズマは本来的に安定な定常波（CW）放電が可能である。このため超伝導コイルでは抵抗損失は勿論、交番損失も生じないのでヘリウム冷凍機への熱負荷が少ない。キーワードには安定化導線と超伝導素線を複合構成する超伝導複合導体 composite conductor や超臨界ヘリウム SHe を素線間に強制流動させる cable in conduit conductor CICC などもある。

次に、施設・設備を個別に見ていこう。まず連続運転 10 年以上を経過するものは TORE-SUPRA と LHD、廃止または不定期運転のものは TRIAM-1M、Demo Coil、EULCT、T-7、T-15 など、運転開始 5 年未満は EAST、KSTAR、SST-1 の 3 例、建設中が ITER と W7-X、そして計画新 T-15 である。Table 2 の ITER の欄にあるとおり、実験炉規模の中性粒子熱負荷は 0.57 メガワット毎平方メートルと想定されており、恒常的に使用可能な炉壁材料の開発も喫緊の課題であり、ITER や次の実験炉の成功は炉材料開発の進展如何にも左右される。

電流リードとは 4.5 K の超伝導ケーブルへ電圧印加する常伝導の銅リードのことである。常温から 4.5 K までの両端間温度勾配のため 4.5 K 低温部への熱侵入は大きい。建設中および計画中の各施設では 4.5 K から 50 K の温度領域に熱抵抗の大きい高温超伝導体 HTC-CL を銅リードに置き代えて使用し、銅リードとの接続部は 80 K の液体窒素で熱遮蔽する。窒素液化の理論仕事はヘリウム液化の $4/80=1/20$ でよいので、HTC-CL の採用で超伝導マグネット冷却用のヘリウム冷凍機の熱負荷は大幅に軽減される。建設中の ITER の場合では世界最大の 22 kW@4.5 K のヘリウム冷凍機 7 台のうち、1 台が削減される³⁾。

次に核融合における中性子の発生機序に関して、核分裂と異なる本質安全性について述べる。

核分裂では中性子による連鎖反応を維持するため臨界質量以上のウラン量が必要である。他方、核融合の対応条件はプラズマ三重積（イオン密度×イオン温度×保持時間）>限界値が“点火条件”である。具体的には 100 兆個/CC、1 億度、1 秒以上の同時達成であり、何れか変量の未達または減失で、プラズマは即時に拡散冷却され融合反応は停止する。

圧力容器としてのプラズマ容器にはほぼ大気の千分の一と低密度に制御された水素燃料がプラズマ状態で閉じ込められる。加熱によって数気圧となるが、もし容器が何かの原因で破壊しても、大気との接触で上記点火条件が維持されないで、中性子の発生も内圧噴出もただちに停止する。加えて、燃焼反応で生成する灰トリチウムは半減期が 12 年、灰ヘリウムは 14 年と短く、扱いも容易なことも核融合が核分裂に勝る点となる。

2.4 加速器施設のプロフィールカード例と解説

Table 3 は Table 1 第 2 行の eV 検索結果 32 件（NBI-injector 2 件を除外）の加速器施設について、調査を進められた 5 例を抜粋し、そのプロフィールカードの施設概要区分 1、2 を示している。

1990 年代以後の大型加速器は、荷電粒子を磁気偏向させるシンクロトロン synchrotron と空洞電場 cavity との共振で加速させるリニアック lineac に分けられる。後者は一過ビームであるが、CEBAF や ILC のように両者を組み合わせる循環型閉ループまたは対向型の直線加速器もある。

Table 3 の mission of experiment 欄にある加速器の用途は、Ph Lebrun によって 4 つのクラスに分類される²⁾。

1. 高速・短波長の粒子を得て高倍率で量子を見る。
2. 光速に近づけて相対論的に静止粒子よりも数桁重い粒子を得る Tevatron。
3. ボルツマン原理が示す超高温度を再現したり RHIC、無電荷の中性子を発生して物質を核破砕（spallation）する SNS、SPL、J-PARC。
4. 電子ビームを偏向させてシンクロトロン放射光 SOR を得て位相を揃えた自由電子レーザ（free electron laser）を作る XFEL、4GSLS。

磁石、空洞は共に超伝導状態で用いられる。超伝導材料は電磁石では各種ニオブ合金が用いられ、空洞の場合は高純度ニオブが単結晶、大粒径化処理されて用いられる。

超伝導化の目的は加速施設ではコンパクト化（用地費削減）と消費電力低減が第一であるが、さらに BCS 理論の示す臨界（遷移）温度との十分な温度余裕と磁場強度を得るため、および加速勾配（MeV/m）を高めるためである。またビームラインの外壁をヘリウム冷却してその内壁にヘリウム以外のあらゆる気体分子を吸着させてライン内の真空度を維持するクライオパネル機能にも超伝導化が不

Table 2 Example of Fusion Device Using SC Technology

Name Institution, Country	LHD Natl. Inst. for Fusion Sci., Toki, Japan	JT60-SA Japan Atomic Energy Agency, Naka, Japan	TORE-SUPRA CEA, Cadarache, France	ITER ITER Org., St. Paul-les-Durance, France	W7-X Max Plank Inst. fur Plasmaphysik, Greifswald, Germany
Type, Characteristic, Mission Exp. Plasma current. fusion power.	Heliotron, Full-SCM, Pulsefree-steady plasmas	Tokamak, Full-SCM, satellite of ITER pulse 100 s, 5.5 MA	Tokamak, SCM-TF, He-II@1.8 K, 1.7 MA	Tokamak, Full-SCM, 300 s burn 500 MW, 15 MA	Stellarater, Full-SCM, Pulsefree-steady plasmas
Torus radii, Mag. Field at Plasma axe@He Temp., coil Stored Energy	3.9/0.5 m, 10 fold plasma symmetry, 3 T@3.5 K, 0.9 GJ	3.01/1.14 m, elipty. 1.83, 2.72 T@4.4 K	2.37/0.37 m, 4.5 T@1.8 K, Fusion power, 0.6 GJ	6.2/2.0 m, 5.3 T@4.5 K, 41 GJ, wall neutron load 0.57 MW/m ²	5.5/1.38 m, 3D-5fold plasma symmetry, 3 T@3.4 K, 0.6 GJ
SCM Troidal Field Coil: TF	NbTi + Al, Composit Conductor, 1 Pair LHe bath cooled Helical coil, 0.92 GJ	NbTi CICC, force SHe cool 18-TF	NbTi CICC, 18-1.8 K He-IIp pool cool TF	Nb ₃ Sn CICC, 18-pump SHe cool TF 41 GJ	NbTi CICC, 20-planner c& 50-non planner coil, 3.8 K pump SHe
SCM Poloidal Field Coil: PF	NbTi CICC@4.8 K, force SHe cooled 3 pair-18 dbl. Pancake PF 1 GJ	NbTi CICC force SHe coold 6 pair PF	Cu resistive water cooled	NbTi CICC 6-pair pump SHe cool PF	
SCM Central Solenoid: CS, SCM Insert Coil: IC		Nb ₃ Sn CICC force SHe coold 4-CF	Cu resistive water cooled	Nb ₃ Sn CICI 6-pump SHe cool CS	
Current Leads	6-Cu GHe	HTS 50 KHe		HTS 50 KHe	HTS 50 KHe
Cold Structure	822 wT	700 wT	50+120 wT	SCM 410 wT	
Worm Comp.	2.7 MW		1.25 kW		1.64 MW
Cold Comp.	2 stage		1.8 K	5-CC Box	3.8 K & 3.3 K
LHe Pump		forced SHe		forced SHe	4-SHe loop
Helium Refrigerator	5.67 kW@4.4 K + 764 L/H + 20 kW@80 K + 0.1 kW@3.5 K	10.2 kW@4.4 K _{eq}	1 kW@4.5 K + 0.3 kW@1.8 K	3-22 kW _{eq} @4.5 K + 2-1.3 MW@80 K LN ₂	7 kW@4.4 K
Operation Career	since 1998~ 67300 hr as of 2011	2007 SCM 2014 plasma planned	since 1988 = for 23 years	2008 SCM 2021 plasma planned	2012~ Ref, Coil assy. scheduled

Table 3 Example of Accelerators using Superconducting Technology (column no. 1, 2 in profile card)

Card No	Facility classification / Name of device / Institute / Country / Mission of experiment / Operation status
6	Electron-positron synchrotron collider / TRISTAN / KEK / Japan / 10 years operation from 1985 at max 32 GeV. Rebuilt to KEKB (B factory) started from 1998 at 8 GeV for electron and 3.5 GeV for positron with high luminosity.
9	Linac / J-PARC / KEK and JAEA / Japan / Pulsed neutron source driven by a 3 GeV proton beam / Helium refrigerator and hydrogen system completed 2007.
18	Linac neutron-scattering facility / SNS / Oak Ridge Natl. Lab. / USA / Spallation Neutron Source produces various type neutron for material research. A 2.4 kW@2.1 K cryogenic system for 81 SC cavities operating since Nov. 2004, neutron production at April 2006 with 0.1 MW power. 1.4 MW full power was expected 2009. Pulse operation revealed new features & a linac energy upgrade to 1.3 GeV with 9 additional cavities (as of 2007)
57	Electron-proton ring collider / HERA / Deutsches Elektron Synchrotron / Germany / 15year's operation since the first H1 and ZEUS experiment at November 1992. Closed on June 2007.
67	Proton-proton collider / LHC / European Org. for Nuclear Res. CERN / Switzerland / Construction completed 2008 and experiment started May 2010. 2-7 TeV beam energy make effective collision energy of 14 TeV. Higgs boson was discovered at 2012 with LHC.

可欠である³⁾。

加速空洞では全て超流動ヘリウム He-II が三重点温度 2.173 K 以下で用いられる。また冷媒分配のため長大な加速器全長に沿って多数の低温分配ボックスが設置され、ヘリウム冷媒を圧力 ~ 0.2 kPa で吸い上げ大気圧 0.1013 MPa まで昇圧する多段の遠心圧縮機が配置される。

Table 3 には最近、国内でも増加中の放射光設備が入れられていない。これは 2.1 節の選定基準に該当しないためであるが、向後の採否には読者の議論に俟ちたい。

3. 機関別の研究状況ファイル

3.1 機関別論文リストの目的

特定の研究機関について研究状況を知るには研究の推移や議論を通年して発表論文から追求せねばならない。

“機関別論文リスト (ホルダー名: **referencelistH26**)” は施設または研究機関毎の研究状況に関するリストである。付加的であるがリストは、WHO's WHO 的情報にもなるので研究者間の情報交換にも活用できる。その使用方法是次のとおりである。まずホルダー内の設備名ファイル (例えば LHD についてはファイル LHD list3-p.xls) を開き、文献番号から標題名や原論文の巻、頁などの情報を得る。なお次章 4.1 “安定運転実績” で引用する論文も同様の方法で参照願いたい。

3.2 リポジトリへのアクセス方法

データベースは 3 種の PC 文書 directory11.fp7 + referencelistH26 + 作業進捗表 H26-6.xls で構成される。

作業進捗表 H26-6.xls は設備概要と文献リスト両ファイル名の対照と最新データの入力状況 (status) を国別に明示している。施設名と機関名の参照に便利である。

PC 文書は公開予定であるが、directory9.fp7 は読者からでも追加改訂が可能とするため pdf 化されない。このため不特定第三者に対する保護手段が確立されるまで開示時期は未定である。低温工学・超電導学会の会員は著者との交信が可能であるので、希望者は、氏名、所属機関、当学会会員番号を通知願いたい。折り返し筆者個人のホームページ URL を通知する。satosada@hera.eonet.ne.jp

4. 安定運転の研究展望

4.1 安定運転実績

当データベースによって抽出した各施設の安全性と安定性に関する最近数年の話題を概観する。

KEK では TRISTAN、SKS について MTBF (Mean Time between Failure) と MTTR (Mean Time to Repair) を発表し、NIFS では核融合実験施設 LHD の運転を 1998 年以来継続しているが、2012 年夏までに延べ 67,278 時間、稼働率 99.1% を記録している。Stanford では BABAR-B-factory における 6 年半の実績と故障例を、Fermi では Tevatron 20 年の運転実績と故障停止時間の分析を、Brookhaven では

重イオン衝突装置 5 年間の実績、さらにドレスデンでの ELBE、DESY の HERA、カナダの ISAC-II、オーストラリアでの OPAL などの報告がある。

CERN の LHC では 2008 年 9 月立ち上げ直後にトンネル内にヘリウム噴出事故を伴い復旧のため 1 カ年停止した。2009 年 11 月復旧し物理実験は 2012 年 7 月、ATLAS/CMS 両検出器で標準理論最後の素粒子ヒッグスを確認した。この間 CAMMS (Computer Aided Maintenance Management System) を開発し、機器の故障分析を通じて 2010 年の再開以来、availability 95% を達成した。

MTBF は機器の安定性 occurrence、MTTR は安全性または停止リスク severity であるから、個別機器について両者をランク分けして両独立変数の積からなる criticality 値 (しきい値) を求め、基準 criticality との近接度を求めると、機器ごとに維持管理や故障被害の重大さを相対的に評価できる。現在、制作途上にある ITER はこの RAMI 分析手法 (reliability, availability, maintainability and inspect ability) で機器の評価と設計を進めている。

加速器は線型、循環型を問わず、直線部分では 1.8 K 超流動ヘリウムで冷却する超伝導共振空洞が用いられる。空洞内ビーム側の SCLV (Sudden Catastrophic Loss of Vacuum) 事故に対する空洞設計の標準化や同安全弁設計も研究所間の共同で実施されている。

本研究は核融合科学研究所の一般共同研究として実施された¹⁾。遂行には元核融合科学研究所の佐藤隆教授、高エネルギー加速器研究機構の新富孝和、春山富義両名誉教授の協力/指導を得た。本稿に記して感謝する。

データベースの記事は筆者の錯誤、原論文の著者や発表時期の区々にもとづく不一致も回避できない。従って Table 2 や Table 3 の記事にも今後追加・改訂が続けられる予定である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤定男:「核融合、加速装置における大型超伝導・冷凍システムの現状アーカイブ調査」、一般共同研究成果報告書 (2013 年 6 月)。核融合科学研究所、610
- 2) Ph Lebrun: ICEC22 “plenary talk”, Abstract No.381 (2008) 1-10
- 3) W.H. Fietz, et al.: Fusion Eng. Des. **84** (2009) 776-779

佐藤 定 男 1936 年 10 月 8 日生。1962 年大阪大学大学院工学研究科修士課程 (機械工学専攻) 修了。同年 (株) 神戸製鋼所機械研究所勤務。ターボ機械、低温冷凍機の開発に従事。1991 年同所退職、文部省・核融合科学研究所に勤務。超伝導大型ヘリカル装置の設計、研究に従事。2000 年退官、名誉教授、工学博士。主要著書: プラズマ・核融合学会誌「小特集: 核融合炉における伝熱・流動の諸問題 5. 超伝導コイルにおける伝熱流動の諸問題」、Vol. 69 No. 12 (1993) 1476-1484、ターボ機械協会第 25 回セミナー教材「高速ターボ機械の開発」(1991) 39-48: 邦訳: O.E. Balje「ターボマシニング 選定・設計および理論への指針」、John Wiley and Sons/神戸製鋼所 (1990)