



INTOR と ITER

宮本 健郎

(Received 30 June 2005)

INTOR (International Tokamak Reactor)

INTOR Phase 2A Part I ('81-'83) と ITER Physics Expert Groups ('99-'02) に参加した者として、ITER が実現に向かって大きく前進したこの時期に、これまでの流れを概略振り返ってみたいと思う。

INTOR は、Zero Phase (Nov.'78-Dec.'79), Phase 1 (Jan.'80-July'81), Phase 2A Part I (Aug.'81-Aug.'83), Phase 2A Part II (Jan.'84-Sep.'85), Phase 2A Part III (Mar.'86-'87) の順を経て進められた(文献[1], Table 1 参照). 全期間を通して EC, 日本, ソ連, 米チームそれぞれの代表は, G. Grieger, 森 茂, B.B. Kadamtsev, W.M. Stacey, Jr で, 議長は森 茂が務め, 4 極はそれぞれのホームチームの支援体制に支えられていた. INTOR が発足した1978年当時の主力装置は PLT, T10 などであったが, まだ実験データベースが不十分で, 特に閉じ込め時間に関する不確定要因が大きかった. かかる状況で 4 極が協力して各フェイズごとに一つの案に纏め上げていくということは国際的にも始めてのことであり, 初期には大変な努力と忍耐が必要であったと聞いている.

装置パラメータを決めるにあたって Hugill-Murakami 密度比例則, Alcator, NeoAlcator 閉じ込め比例則, Troyon ベータ比例則などが用いられていた. 1984年に Troyon ベータ比例則が発表され, その結果 Phase 2 A Part III において, プラズマ電流値が 6 MA から 8 MA にバージョンアップされた. 1982年に ASDEX により H モードが発見された. 1983年頃から TFTR, JET, 1986年頃から JT-60の実験が始まり, 1984, 1985年に Goldston 比例則, Keye-Goldston 比例則が導かれた. いわゆる加熱入力増大による閉じ込め劣化が明らかになるにつれて, INTOR のパラメータは, 再検討を迫られることになった(Table 2 参照).

しかしシングルヌルダイバータ配位をもつ炉設計, ICRF加熱ランチャ設計, モデリング, 炉工学設計などで大きな進展があった. 4 極によってほぼ10年にわたり INTOR の共同設計作業をなしとげ, 互いの信頼を築くことができたことは, 次のステップに進む礎になったと思う. ウィーン IAEA 本部の建物の一角にあった Workshop 会議室の壁に, ある時(1982年頃か) 4人による共同作業がうまくいかなかった場合にどうなるか, 自戒をこめてであろうが次の一文が何気なく張ってあった.

Who's job is it?

This is a story about four peoples named Everybody, Somebody, Anybody and Nobody. There was an important job to be done. Everybody was asked to do it. Everybody was sure Somebody would do it. Anybody could have done, but Nobody did it. Somebody got angry about that, because it was Everybody's job. Everybody thought Anybody could do it, but Nobody realized that Everybody wouldn't do it. It ends up that Everybody blames Somebody when Nobody did what Everybody could have done.

ITER

ITER 計画は, Conceptual Design Activity (CDA April '88-Dec.'90) (文献[2]), Engineering Design Activity (EDA July'92-July'98) (文献[3]), EDA-FEAT (July '99-July'01) (文献[4]) の段階を経て, およそ14年間に亘った. CDA 期間の議長は苦米地 顕, EDA 期間の所長は最初 P.H. Rebut 次に R. Aymar, 副所長は下村安夫, EDA-FEAT では Aymar 所長, 下村副所長である. ITER の組織については文献[5]を参照されたい. 1998年に ITER-EDA の最終報告が提出されたが, 予算が巨額になったことが一因となって, 米国が撤退した. そのため残りの 3 極が装置の小型化を検討し, EDA をさらに 3 年延長することになった. EDA-FEAT 期間においては日本がリーダーシップを発揮している. これらの経緯については, 文献[4]の Outline Design Draft for the TAC Reviews, 文献[6-8]を参照されたい.

ITER-CDA の期間中に, 大型トカマクの実験データがかなり出てきた. Greenwald 密度('88), Lモード閉じ込め比例則 ITER89-P ('89), Hモード閉じ込め比例則 (ITER 89-P のおよそ 2 倍程度, IPB98y2) など実験データベースが次第に整ってきた. これらに基づいて CDA の設計装置がコンパクトに纏め上げられた. 他方アスペクト比が 2.8, プラズマ電流 22 MA であるので, 電流駆動による定常化にはやや難しいパラメータになっている.

ITER-EDA の設計パラメータには, Rebut の考え方が反映している. 1992年当時, 彼は Hモード運転をオプションと位置づけていた. Rebut-Lallia の Lモード比例則の閉じ込め時間を計算すると $\tau_{E(R-L)} = 5.6 \text{ s}$ で必要とされる閉じ込め時間に近い. 装置が大きくなったので Greenwald 密度 n_G が小さくなり, 密度は n_G の 1.15 倍となっているが, L

Table 1 INTOR 計画と ITER 計画の時間経過

年	フェイズ	比例則	大型トカマク実験
78	INTOR 0		
79		Alcator 比例則, Hugill-Murakami n 比例則	
80	INTOR 1		
81			TFTR 12月開始
82	INTOR 2A1	H モードの発見, $\tau_E^{\text{Hmode}} \sim 2\tau_E^{\text{Lmode}}$	JET 開始
83			
84	INTOR 2A2	Goldston 比例則, Troyon β 比例則	
85			JT60 開始
86	INTOR 2A3		
87			
88	ITER CDA	Greenwald n 比例則	
89		L モード 89P 比例則	
90			
91			JT60U 改造
92	ITER EDA		
93			
94			
95			
96			
97			TFTR 終結
98		IPB98y2 比例則	
99	ITER FEAT		
00			
01	Final Report		

モードならばこれでも良いと考えていたかもしれない。しかし必要とされる閉じ込め時間は IPB98y2 比例則の値と一致していて、現在のデータベースと良く整合している。

ITER-EDA から ITER-EDA/FEAT への小型化には次の要因によって可能になったと考えられる(文献[6])。a) 誘導電流駆動モードにおいてエネルギー増倍率 Q を無限大から10に変えたこと、b) Nb₃Sn の大型超伝導コイルの開発が進み、中心ソレノイドを分割型にしても信頼性の高い設計が可能になってきて、高非円形プラズマを可能にしたこと、c) プラズマ断面の高い楕円度、三角度の閉じ込め優位性が確認できたこと、d) Greenwald 密度 $n_G \propto I_p/a^2 \propto B_t K^2/q_{cy}R$ を大きくするためには高磁場 B_t 、小主半径 R 、高非円形度 κ が望ましい等の事由 ($K^2 = (1 + \kappa^2)/2$)、 $q_{cy} \equiv (Ka/R)(B_t/B_p)$ 。また ITER-EDA のパラメータに比べてプラズマ電流値が小さく、アスペクト比が大きくなって非誘導電流駆動による定常化に有利な方向に変えている。

2001年 ITER-EDA-FEAT の完了とともに ITER Physics Expert Groups の活動は IAEA 傘下の ITPA (International Tokamak Physics Activities) に組み替えられ、米国チームが完全復帰した。ITER 計画実施までの経過措置の中で、ITER Implementation Agreement に2003年米国が復帰し、中国が、続いて韓国が新たに加わった。そして兎に角 ITER サイトの決定までにこぎつけた。

過去四半世紀におけるトカマクに関するプラズマ物理の

Table 2 INTOR, ITER CDA, ITER EDA, ITER FEAT のパラメータ。

	INTOR	ITER CDA	ITER EDA	ITER FEAT
	ref.1	ref.2	ref.3	ref.4
R (m)	4.9	6.0	8.14	6.2
a (m)	1.2	2.15	2.8	2.0
A	4.1	2.8	2.9	3.1
κ	1.6*	2.0 [†]	1.6*	1.7*
B_t (T)	5.5	4.85	5.68	5.3
I_p (MA)	8	22	21	15
$\langle n_e \rangle (10^{20} \text{ m}^{-3})$	1.4	1.22	0.98	1.0
N_G	0.8	0.8	1.15	0.85
$\langle T \rangle$ (keV)	10	10	12.9	8.5
β (%)	4.9	4.2	3	2.5
β_N	3.8	2.0	2.29	1.77
P_{fusion} (MW)	585	1000	1500	410
τ_{burn} (s)	200	200	1000	400
Q	∞	∞	∞	10
τ_E (required)(s)	1.4	3.8	5.9	3.7
$\tau_E^{\text{ITER89-P}}$ (s)	0.48	1.9	1.75	1.6
H_L	2.9	2.0	3.37	2.3
τ_E^{IPB98y2} (s)	0.81	3.8	5.9	3.7
H_{Hy2}	1.73	1.0	1.0	1.0

* single null, [†] double null, N_G Greenwald normalized density, β_N Troyon normalized beta, H_L and H_{Hy2} are confinement enhance factors normalized by $\tau_E^{\text{ITER89-P}}$ and τ_E^{IPB98y2} respectively.

進展はめざましいものがある(たとえば文献[9, 10]参照)。ITPA に対して、EU のさまざまな研究所の人々が互いに連携をとって積極的に参加しているのが印象的であった。日本も全国の研究者が有機的、かつ積極的に参加しないと ITER の中でこれまでのようになりリーダーシップを保持することはむずかしいと感じた。若い世代の健闘に期待したい。

参考文献

- [1] INTOR:
S. Mori and INTOR Group, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (Conf. Proceeding, Kyoto in 1986) Vol.3, 195, 1987.
IAEA Vienna
INTOR Zero Phase/ Phase 1/ Phase2A-1/ Phase2A-2 / Phase2A-3 1980/'81/'83/'85/'87 IAEA, Vienna
- [2] ITER CDA:
Y. Shimomura, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (Conf. Proceeding, Washington D.C. in 1990) Vol.3, 271, 1991 IAEA Vienna.
ITER Concept Definition Vol.1.2 (ITER Documentation Series No.3) 1989 IAEA, Vienna.
- [3] ITER EDA:
Technical Basis for the ITER, Final Design Report Cost Review and Safety Analysis (ITER EDA Documentation Series No.16) 1998 IAEA, Vienna.
- [4] ITER EDA/FEAT:
R. Aymar, V. Chuyanov, M. Huguet, Y. Shimonura, IAEA CN-77/ITER OV/1, Fusion Energy Conference in Sorrento 2000, Technical Basis for ITER-FEAT Outline Design Draft for TAC Review Dec. 1999.

- [5] 山本賢三：核融合の40年（1997, (株)ERC 出版）。
- [6] Y. Shimomura, J. Plasma Fusion Res. **76**, 949 (2000).
- [7] H. Kishimoto, J. Plasma Fusion Res. **76**, 621 (2000).
- [8] 岸本 浩, 下村安夫：日本物理学会誌 **57**, 391 (2002).
- [9] ITER Physics Basis, Nucl.Fusion **39**, 1999.
- [10] 宮本健郎：プラズマ物理・核融合（2004, 東京大学出版会）。
- K. Miyamoto, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion* (2005, Springer).

Plasma & Fusion Calendar

- 学会ホームページ (<http://www.jspf.or.jp/>) に最新の詳細な情報を掲載しています。併せてごらんください。

開催月日	名 称 (開 催 地)
2005 8.29 - 8.31	5th General Scientific Assembly of Asia Plasma & Fusion Association on Progress of Fusion Science and Technology in Asia (Jeju, Korea)
8.31 - 9. 2	VACUUM2005 第27回真空展 (東京ビッグサイト東ホール)
9. 4 - 9. 9	4th Int. Conf. Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA05) (Mechelen, The Netherlands)
9. 5 - 9. 7	日本流体力学会年会2005 (工学院大学新宿校舎)
9. 5 - 9. 8	EUROMAT 2005 (Symposium C32: Materials for Fusion Applications) (Prague, Czech Republic)
9. 6 - 9. 9	Int. Conf. Research and Applications of Plasmas (PLASMA-2005), 3rd German-Polish Conf. Plasma Diagnostics for Fusion and Applications, and 5th French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratory (Opole, Poland)
9. 5 - 9.16	7th Carolus Magnus Summer School on Plasma Physics (Mechelen, The Netherlands.)
9. 5 - 9.30	Autumn College on Plasma Physics (Trieste, Italy)
9. 7 - 9.11	応用物理学会秋季講演会 (徳島大学)
9.12 - 9.15	日本物理学会秋季大会 (素・宇) (大阪市大杉本キャンパス)
9.12 - 9.16	5th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (Qingdao City, China)
9.12 - 9.16	14th Int. Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies (VEIT2005) (Varna, Bulgaria)
9.13 - 9.15	US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling of Multi-Scale Physics in Fusion Plasmas (応用力学研究所研究集会 核燃焼プラズマ統合コード研究会共催) (九州大学)
9.13 - 9.15	日本原子力学会 秋の年会 (八戸工業大)
9.19 - 9.22	日本物理学会秋季大会 (物性) (同志社大京田辺キャンパス)
9.20 - 9.24	日本物理学会秋季大会 (核) (ハワイ・マウイ島)
9.21 - 9.23	Int. Symp. Isotope Science and Engineering from Basics to Applications (2nd Int. Symp. Isotope Effects in Physics, Chemistry and Engineering) (名古屋)
9.22	東レ科学振興会第55回科学講演会「宇宙の謎に挑む」(有楽町朝日ホール)
9.25 - 9.30	12th Int. Symp. on Laser-Aided Plasma Diagnostics (LAPD-12) (Utah, USA)
9.26 - 9.28	11th European Fusion Theory Conf. (Aix-en-Provence, France)
9.26 - 9.29	21st Symposium on Fusion Engineering (SOFE2005) (Tennessee, USA)
9.26 - 9.30	5th Int. Symp. Applied Plasma Science (ISAPS '05) (ヒロハワイアンホテル, ハワイ) 阪大接合研 小林 明 kobayasi@jwri.osaka-u.ac.jp
9.28 - 9.30	10th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers (St. Petersburg, Russia)
10. 3 - 10. 6	3rd IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and 11th Int. Workshop on Spherical Torus (St. Petersburg, Russia)
10. 3 - 10. 7	15th International Stellarator Workshop (Madrid, Spain)
10. 3 - 10.14	CERN Accelerator School (Trieste, Italy)
10. 8 - 10.10	第41回熱測定討論会 (九大箱崎キャンパス)
10.10 - 10.11	IAEA Technical Meeting on Innovative Concepts and Theory of Stellarators (Madrid, Spain)
10.11 - 10.12	Fusion Power Associates Annual Meeting and Symposium "Fusion and Energy Policy" (Washington, DC USA)
10.16 - 10.19	10th Int. Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (PET10) (Jülich, Germany)
10.16 - 10.20	58th Gaseous Electronics Conference (GEC) (San Jose, CA, USA)
10.24 - 10.28	47th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Denver, Colorado, USA)
10.30 - 11. 4	AVS 52nd Int. Symp. (Boston, USA)
10.31 - 11. 4	29th Int. Electric Propulsion Conference (IEPC05) (Princeton University, USA)
11. 8 - 11.14	Global and Local Control of Tokamak Plasmas (Erice, Italy)

開催月日	名 称 (開 催 地)
11. 9 - 11. 11	9th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems (Takayama, Japan) IAEATM-EP2005@nifs.ac.jp
11. 9 - 11. 11	第46回真空に関する連合講演会 (学習院大学記念会館)
11. 15 - 11. 18	4th Int. Symp. Beamed Energy Propulsion (ISBEP4) (Nara, Japan)
11. 24	第18回専門講習会「ナノチューブ・炭素新材料の合成と精製の最近の発展」(キャンパス・イノベーションセンター, 東京都港区) 本学会 gakkai@nifs.ac.jp
11. 28 - 11. 30	The 27th International Symposium on Dry Process (DPS2005) (Ramada Plaza Jeju Hotel, 韓国・済州島)
11. 29 - 12. 2	プラズマ・核融合学会 第22回年会 (タワーホール船堀, 東京都江戸川区) 本学会 gakkai@nifs.ac.jp
11. 30 - 12. 2	IAEA Technical Meeting on Research Use of Small Fusion Devices (Mexico City, Mexico)
12. 4 - 12. 9	12th Int. Conf. Fusion Reactor Materials (CA, USA)
12. 5 - 12. 9	15th International Toki Conference "Fusion & Advanced Technology" (セラトピア土岐, 岐阜県) itc15@nifs.ac.jp
12. 5 - 12. 9	Latin American Workshop on Plasma Physics (Mexico City, Mexico)
2006 1. 24 - 1. 27	6th International Conference on Reactive Plasmas and 23rd Symposium on Plasma Processing (ICRP-6/SPP-23) (ホテル大観荘, 宮城県松島)
2. 9 - 2. 10	レーザー学会第26回年次大会 (大宮ソニックシティ)
3. 24 - 3. 26	日本原子力学会春の年会 (大洗)
3. 27 - 3. 30	日本物理学会第61回年次大会 (愛媛大城北地区・松山大)
4. 22 - 4. 25	International Sherwood Fusion Theory Conference (Dallas, Texas, USA)
5. 22 - 5. 26	17th Int. Conf. Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Device (Hefei Anhui, China)
5. 22 - 5. 26	13th International Congress on Plasma Physics (Kiev, Ukraine)
5. 29 - 5. 30	8th Int. Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials (黄山, China)
6. 4 - 6. 8	IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS2006) (Michigan, USA)
6. 13 - 6. 14	第6回核融合エネルギー連合講演会 (富山市) 本学会 gakkai@nifs.ac.jp
6. 19 - 6. 23	33rd European Physical Society Conference on Plasma Physics (Rome, Italy)
9. 23 - 9. 26	日本物理学会秋季大会 (物性) (千葉大学西千葉キャンパス)
9. 25 - 9. 29	Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV) (Matsue, Japan)
10. 16 - 10. 22	21st IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu, China)
10. 30 - 11. 3	48th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Pennsylvania, USA)
11. 13 - 11. 17	AVS 53rd International Symposium (California, USA)
2007 6. 18 - 6. 22	22nd Symposium on Fusion Engineering (SOFE2007) (New Mexico, USA)
6. 18 - 6. 22	IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference (PPPS2007) (Albuquerque, New Mexico USA)
9. 2 - 9. 14	8th Carolus Magnus Summer School on Plasma Physics (Bad Honneff, Germany)
10. 1 - 10. 5	8th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-8) (Heidelberg, Germany)
11. 12 - 11. 16	49th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Florida USA)
11. 15 - 11. 19	AVS 54th International Symposium (Washington USA)
12. 3 - 12. 6	APCOM-EPMESEC'07 (国立京都国際会館)
2008 6. 16 - 6. 19	35th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS2008) (Karlsruhe, Germany)