

長寿命核分裂生成物の核データとデータベース

Nuclear data and database for transmutation of long-lived fission products

北海道大学大学院理学研究院

合川 正幸、江幡 修一郎¹、ダグワドルジ イチンホルロー

AIKAWA Masayuki, EBATA Shuichiro, DAGVADORJ Ichinkhorloo
Faculty of Science, Hokkaido University

Abstract

We promote the project “Nuclear Reaction Data Compilation” as a part of the Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program (ImPACT) “Reduction and Resource Recycling of High-level Radioactive Wastes through Nuclear Transmutation”. Our activity in Japanese fiscal year 2017 is reported.

1 はじめに

革新的研究開発プログラム (ImPACT) 「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」(藤田玲子プログラムマネージャー) [1]において、核変換に関する各種物理量(核データ)のデータベース化は必要不可欠である。このプログラムでは複数のプロジェクトが同時に進行しており、プロジェクト2「核反応データ取得&新核反応制御法」では核データ取得実験を、プロジェクト3「反応理論モデルとシミュレーション」では理論計算やシミュレーションを実施している。

我々のグループでは、プロジェクト2とプロジェクト3を結びつける核データのデータベース化を実施している。2017年度は下記5項目を実施した。

1. 実験情報の収集・データ入力
2. 過去のデータ調査・入力
3. 新形式の開発
4. 検索・利用システム開発・テスト
5. 核データ取得手法の研究

それぞれの項目に関する今年度の成果を報告する。

¹現所属：東京工業大学 環境・社会理工学院

2 成果概要

2.1 実験情報の収集・データ入力

プロジェクト2の成果として論文発表された⁹³Zrの実験データ[2]を、国際原子力機関(IAEA)が管理するデータベースEXFORへの登録手続きを行った。また、そのデータを検索システムに反映した。作業手順は下記のとおりである。

1. 論文発表以前に著者から数値データ受領
2. 論文発表後、EXFOR登録番号(E2539)割り当て
3. 実験情報を含むEXFOR形式のファイル暫定版を作成
4. IAEA及び国際核反応データセンターネットワーク(NRDC)へEXFORファイル暫定版を送信
5. IAEA及びNRDCの形式チェックに基づく修正コメント受領
6. 受領したコメントに基づいて暫定版を修正し、EXFORファイル確定版作成
7. EXFORファイル確定版をIAEA及びNRDCに送信
8. IAEAのWebサイト上でEXFORファイル確定版を共有
9. 北大グループのWebサイト(<http://www.jcprg.org/>)及び検索システム(<http://www.jcprg.org/exfor/>)で公開(図1,2)

一連の作業により、Webサイト上でダウンロード及び検索・作図が可能になった(図3,4)。

一方で、論文として発表される前の暫定的なデータは公開できないため、筑波大学のサーバ上でプログラム内のメンバーのみで共有した。

2.2 過去のデータ調査・入力

プロジェクト2で測定した¹⁰⁷Pd及び⁹³Zrの実験データ情報を追加した(図5,6)。これにより平成29年度までに発表されているデータの調査が終了した。

2.3 新形式の開発

プロジェクト2で成果として論文発表された¹⁰⁷Pd及び⁹³Zr、それぞれの核データを、PHITSのFrag Data形式で作成した(図7)。Frag Data形式では、生成核種の生成断面積と二重微分断面積をテーブル化する必要がある。重い生成核種の生成断面積は実験値を用い、軽核(陽子、中性子、重陽子、 α 粒子)の二重微分断面積はPHITSの計算値を用いた(図8)。

2.4 検索・利用システム開発・テスト

プロジェクト2で測定した¹⁰⁷Pd及び⁹³Zrの実験データ情報を追加した。これにより、¹⁰⁷Pd及び⁹³Zrのデータが検索可能になった(図9,10)。

ENTRY	E2539	20171219	E253900000001
SUBENT	E2539001	20171219	E253900100001
BIB	11	39	E253900100002
TITLE	Study of proton- and deuteron-induced spallation reactions on the long-lived fission product ⁹³ Zr at 105 MeV/nucleon in inverse kinematics		
AUTHOR	S.Kawase, K.Nakano, Y.Watanabe, H.Wang, H.Otsu, H.Sakurai, D.S.Ahn, M.Aikawa, T.Ando, S.Araki, S.Chen, N.Chiga, P.Doornenbal, N.Fukuda, T.Isobe, S.Kawakami, T.Kin, Y.Kondo, S.Koyama, S.Kubono, Y.Maeda, A.Makinaga, M.Matsushita, T.Matsuzaki, S.Michimasa, S.Momiyama, S.Nagamine, T.Nakanura, M.Niikura, T.Ozaki, A.Saito, T.Saito, Y.Shiga, M.Shikata, Y.Shimizu, S.Shimoura, T.Sunikama, P.Soderstrom, H.Suzuki, H.Takeda, S.Takeuchi, R.Taniguchi, Y.Togano, J.Tsubota, M.Uesaka, Y.Watanabe, K.Wimmer, T.Yasamoto, K.Yoshiida		
INSTITUTE	(JPNKYU) Department of Advanced Energy Engineering Sciences (JPNIPC) Ni-shina Center (JPNHOK) Faculty of Science (JPNTOX)		

図 1: EXFOR 形式のファイル (E2539)
(<http://www.jcprg.org/exfor/E/e2539.txt>)

図 2: EXFOR 検索サイト
(<http://www.jcprg.org/exfor/>)

Plot	Author	Year	Inc. energy (eV)	Work/Type	Reference	Library	Data ID
*	(1-H-2(40-ZR-93,X)ELEM/MASS,SIG)=(40-ZR-93(D,X)ELEM/MASS,SIG)						
1	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.013
2	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.012
3	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.011
4	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.010
5	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.009
6	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.008
*	(1-H-1(40-ZR-93,X)ELEM/MASS,SIG)=(40-ZR-93(P,X)ELEM/MASS,SIG)						
7	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.007
8	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.006
9	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.005
10	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.004
11	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.003
12	S.Kawase et al.	2017	1.0e+08	1.0e+08 Expt Jour	PTEP,2017,093D03,2017	EXFOR	E2539.002

図 3: ⁹³Zr の検索結果

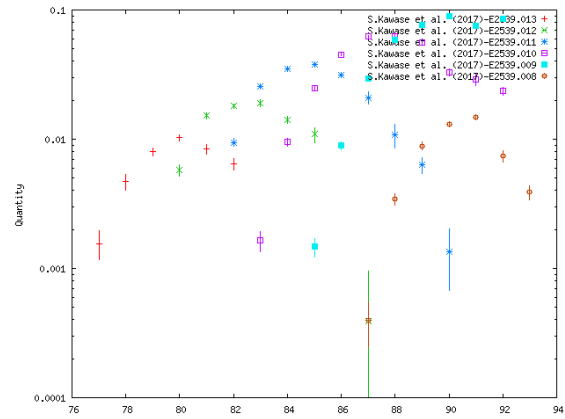


図 4: 検索結果から図示した断面積

2.5 核データ取得手法の研究

我々のグループが提案した相互作用断面積の測定手法 (Thick-Target Transmission 法 (T3 法)) [3] に関して、Frag Data を用いた PHITS[4] のシミュレーションを、実験データが得られた ¹⁰⁷Pd 及び ⁹³Zr について実施した。

3 まとめ

革新的研究開発プログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」(藤田玲子プロジェクトマネージャー) において、核反応データベースに関する研究開発を実施している。長寿命核分裂生成物 4 核種 (⁷⁹Se, ⁹³Zr, ¹⁰⁷Pd, ¹³⁵Cs) に関して、(1) 実験情報の収集と測定データの入力、(2) 過去のデータ調査と入力、(3) PHITS シミュレーションで実験データを用いるための新

形式の開発、(4) 検索・利用システム開発及びテスト、(5) より効率的な核反応データ取得手法の計5項目を担当した。本稿では、これらの項目について2017年度の進捗を報告した。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。

参考文献

- [1] 革新的研究開発プログラム (ImPACT) 「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」(藤田玲子プログラムマネージャー), <http://www.jst.go.jp/impact/program/08.html>
- [2] S. Kawase et al., “Study of proton- and deuteron-induced spallation reactions on the long-lived fission product ^{93}Zr at 105 MeV/nucleon in inverse kinematics”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 093D03
- [3] M. Aikawa et al., “Thick-target transmission method for excitation functions of interaction cross sections”, Nucl. Instr. Meth. B383 (2016) 156.
- [4] T. Sato, et al., “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52”, J. Nucl. Sci. Technol. 50 (2013) 913.

Projectile	#	Reaction	Reference	Data_ID#
Gamma	0(1)	107Pd(γ ,ABS)	Theo: 3D Skyrme Cb-TDFHB	107PD5E.01
Neutron	7	107Pd(N,γ)108Pd	J. Korean Phys. Soc. 59 (2011) 1773 (Nucl. Data Sheet 119 (2014) 143) J. Nucl. Sci. Technol. 44 (2007) 103	23140.006, 23140.004 14133.002
			Book: Atlas of Neutron Resonances 2006	V1001.455, V1001.457
			At. Data Nucl. Data Tables 76 (2000) 70	V0102.197
			Nuclear Science and Engineering 89 (1985) 79	12874.003
Proton	1	107Pd(p,x)	Prog. Theor. Exp. Phys. 2017 (2017) 021D01	E2518.002-009, E2518.018-023
Deuteron	1	107Pd(d,x)	Prog. Theor. Exp. Phys. 2017 (2017) 021D01	E2518.010-017, E2518.024-029
^4He	0	—	—	—
^{12}C	0	—	—	—

図 5: ^{107}Pd の反応に関する核データ一覧

Projectile	#	Reaction	Reference	Data_ID#
Gamma	0(1)	93Zr(γ ,ABS)	Theo: 3D Skyrme Cb-TDFHB	093Zr5E.01
Neutron	8	93Zr(N,γ)94Zr	Phys. Rev. C87 (2013) 014622 J. Nucl. Sci. Technol. 44 (2007) 21	23194.009 14132.003
			Book: Atlas of Neutron Resonances 2006 (NEUT.RES)	V1001.374, V1001.375, V1001.376
			At. Data Nucl. Data Tables 76 (2000) 70	V0102.163
			Semiannual Progress Rep. ORNL 1879 (1955) 50	11885.002
		(Resonance prop.)	Nuclear Science and Engineering 92 (1986) 525	12923.002
		(Resonance prop.)	Astrophysics and Space Science 115 (1985) 71	12915.002
		(Resonance prop.)	Semiannual Progress Rep. ORNL 2610 (1958) 22	12012.003
Proton	1	93Zr(p,x)	Prog. Theor. Exp. Phys. 2017 (2017) 093D03	E2539.002-007
Deuteron	1	93Zr(d,x)	Prog. Theor. Exp. Phys. 2017 (2017) 093D03	E2539.008-013
^4He	0	—	—	—
^{12}C	0	—	—	—

図 6: ^{93}Zr の反応に関する核データ一覧

```

deuteron      # Projectile
107Pd # Target

4 # Energy bins of projectile
  10 25. 50. 100. 200.
  0  0  0  0  0

12 # Energy bins of outgoing particles
  .01 10. 20. 30. 40. 50. 60. 70. 80. 90. 100. 150. 200.

-15 # Angle bins of outgoing particles
  0. 5. 10. 15. 20. 25. 30. 40. 50. 60. 70. 80. 90. 120. 150. 180.

72 # Outgoing particles
neutron proton deuteron alpha
107Ag 106Ag 105Ag 104Ag 103Ag
102Ag 101Ag 100Ag
106Pd 105Pd 104Pd 103Pd 102Pd
101Pd 100Pd 99Pd 98Pd
106Rh 105Rh 104Rh 103Rh 102Rh
101Rh 100Rh 99Rh 98Rh 97Rh
96Rh 95Rh
104Ru 103Ru 102Ru 101Ru 100Ru
99Ru 98Ru 97Ru 96Ru 95Ru
94Ru
99Tc 98Tc 97Tc 96Tc 95Tc
  
```

図 7: $^{107}\text{Pd}+d$ 反応の Frag Data 入力データの定義部分

```

# DDX @ 100 MeV : proton

5.3665E+00 5.3551E+00 5.3819E+00 5.3317E+00 5.3412E+00
5.4185E+00 5.3056E+00 5.3739E+00 5.3655E+00 5.2843E+00
5.3035E+00 5.2360E+00 4.9690E+00 4.7074E+00 4.5604E+00

5.1814E+00 5.4023E+00 5.2226E+00 5.4458E+00 5.6140E+00
5.6628E+00 5.6984E+00 5.7696E+00 5.5922E+00 4.8865E+00
3.8700E+00 3.2918E+00 2.2628E+00 1.4715E+00 1.0887E+00

3.9085E+00 4.0135E+00 4.1814E+00 4.2978E+00 4.3449E+00
4.3847E+00 4.5728E+00 4.7088E+00 4.3900E+00 3.3198E+00
2.3053E+00 1.7058E+00 1.0732E+00 5.1120E-01 3.0667E-01

3.6989E+00 3.6757E+00 3.8328E+00 3.8677E+00 4.0172E+00
4.1810E+00 4.3391E+00 4.4333E+00 3.5216E+00 2.4014E+00
1.5946E+00 1.2081E+00 6.7806E-01 2.8592E-01 1.6333E-01

4.1631E+00 4.0060E+00 3.8600E+00 3.9231E+00 4.0206E+00
4.0766E+00 4.2607E+00 2.9000E+00 2.6000E+00 1.5007E+00
  
```

図 8: $^{107}\text{Pd}+d$ 反応の Frag Data 入力データの二重微分断面積部分

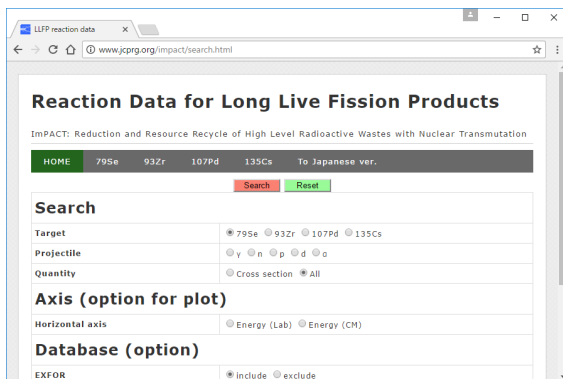


図 9: 検索サイト

Plot	Author	Year	Inc. energy (eV)	Work Type	Reference	Library	Data ID
* 46-PD-107(N,TOT),WID (Resonance width)							
1	R.L.Macklin	1985	0.0e+00 0.0e+00	Expt Jour	NSE,89,79,1985	EXFOR	12874.002 3
- 46-PD-107(N,G)46-PD-108,,SIG,,MXW,RECOM (Cross section- Maxwellian average- Recommended data)							
2	S.F.Mughabghab	2006	0.0e+00 0.0e+00	Expt Book	NEUT.RES.,2006	EXFOR	V1001.457
3	Z.Y.Bao et al.	2000	0.0e+00 0.0e+00	Expt Jour	AND,76,70,2000	EXFOR	V0102.197
* 46-PD-107(N,G)46-PD-108,,SIG,,AV (Cross section- average)							
4	R.L.Macklin	1985	3.0e+03 0.0e+05	Expt Jour	NSE,89,79,1985	EXFOR	12874.003
* 46-PD-107(N,G)46-PD-108,,SIG,,CALC (Cross section- Calculated data)							
5	S.F.Mughabghab	2006	2.5e-02 2.5e-02	Expt Book	NEUT.RES.,2006	EXFOR	V1001.455
- 46-PD-107(N,G)46-PD-108,,RI (Resonance Integral)							

図 10: 検索結果