

長寿命核分裂生成物の核変換に関する実験データと データベース化

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

北海道大学大学院理学研究院
江幡 修一郎、合川 正幸
北海道大学高等教育推進機構
今井 匠太郎

EBATA Shuichiro, AIKAWA Masayuki
Faculty of Science, Hokkaido University

IMAI Shotaro
Institute for the Advancement of Higher Education, Hokkaido University

Abstract

The Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program (ImPACT) “Reduction and Resource Recycling of High-level Radioactive Wastes through Nuclear Transmutation” has launched since October 2015. We contribute to the project by compilation of new nuclear data of transmutation and collaborative study with other members. The activities in Japanese fiscal year 2016 are 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、核変換に関連する各種物理量 (核データ) の取得及びデータベース化は必要不可欠である。本プログラムでは複数のプロジェクトが進められており、プロジェクト2では核反応データの取得及び新核反応制御法に関する研究を、プロジェクト3では原子核物理学を基にした核構造及び核反応の理論計算やシミュレーションのほか、関連する核データのデータベース化などを実施している。北海道大学のグループはプロジェクト3の一員として核データのデータベース化などを実施している。

本稿では、ImPACT における研究開発の進捗状況について報告する。

2 成果概要

我々のグループは、下記の5項目について研究開発を行っている。

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は以下のとおりである。

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 ^{107}Pd への陽子及び重陽子入射反応による実験断面積データ [2] を採録し、国際原子力機関 (IAEA) が管理するデータベース EXFOR への登録を行った。また、当該データを検索システムへ反映した。一連の手順は下記のとおりである。

1. 論文への EXFOR 登録番号 (E2518) 割り当て
2. 論文から情報を抽出し、EXFOR 形式のファイル暫定版を作成
3. 著者に数値データ提供依頼・受領し、EXFOR ファイル暫定版へ追加
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/exfor/E/e2518.txt>) 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)。また、プロジェクト2で論文準備中の ^{93}Zr の実験データ [3] について、EXFOR 登録番号 (E2537) 割り当て及び EXFOR 形式のファイル作成を開始した。

2.2 過去のデータ調査・入力

昨年度 Web サイト (<http://www.jcprg.org/impact/>) 上にまとめた ^{79}Se 、 ^{93}Zr 、 ^{107}Pd 、 ^{135}Cs に関する過去の実験データに、周辺核種の情報を追加した (図 5,6)。

ENTRY	E2518	20170508	E25180000001
SUBENT	E2518001	20170508	20170529
BIB	9	35	E25180010002
TITLE	Spallation reaction study for the long-lived fission product, ^{107}Pd		
AUTHOR	(H.Wang, H.Otsu, H.Sakurai, D.Ahn, M.Aikawa, T.Ando, S.Araki, S.Chen, N.Chiga, P.Doornenbal, N.Fukuda, T.Isobe, S.Kawakami, S.Kawase, T.Kiri, Y.Kondo, S.Koyama, S.Kubono, Y.Maeda, A.Makinaga, M.Matsushita, T.Natsuzaki, S.Nichinasa, S.Moriyama, S.Nagamine, T.Nakamura, K.Nakano, M.Niikura, T.Ozaki, A.Saito, T.Saito, Y.Shiga, M.Shikata, Y.Shimizu, S.Shimoura, T.Sumikama, P.Soederstrom, H.Suzuki, H.Takeda, S.Takeuchi, R.Tanuchi, Y.Togano, J.Tsubota, M.Uesaka, Y.Watanabe, Y.Watanabe, K.Wimmer, T.Yamamoto, K.Yoshida)		
INSTITUTE	(2JPNIPC) RIKEN Nishina Center (2JPNHCK) Faculty of Science (2JPNKYO) Department of Physics (2JPNKYU) Department of Advanced Energy Engineering Science (2JPNMZK) Department of Applied Physics (2JPNTKO) Center for Nuclear Study		

図 1: EXFOR 形式のファイル (E2518)
(<http://www.jcprg.org/exfor/E/e2518.txt>)

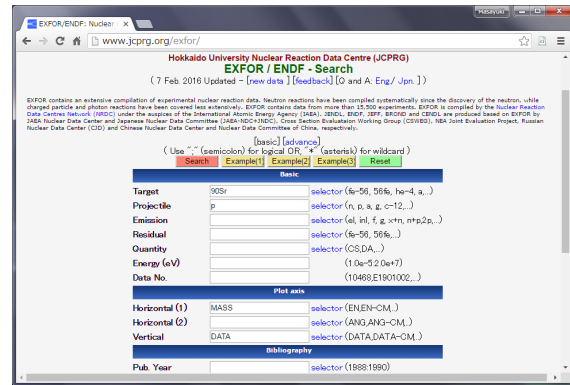


図 2: EXFOR 検索サイト
(<http://www.jcprg.org/exfor/>)

Plot	Author	Year	Inc. energy (eV)	Work Type	Reference	Library	Data ID
<input type="checkbox"/>	(1-H-2(46-PD-107,X)ELEM/MASS,SIG)=(46-PD-107(D,X)ELEM/MASS,SIG)						
<input type="checkbox"/>	H.Wang et al.	2017	1.2e+08	Expt	Jour PTEP,2017,021D01,2017	EXFOR	E2518.029
<input checked="" type="checkbox"/>	H.Wang et al.	2017	1.2e+08	Expt	Jour PTEP,2017,021D01,2017	EXFOR	E2518.028
<input type="checkbox"/>	H.Wang et al.	2017	1.2e+08	Expt	Jour PTEP,2017,021D01,2017	EXFOR	E2518.027
<input type="checkbox"/>	H.Wang et al.	2017	1.2e+08	Expt	Jour PTEP,2017,021D01,2017	EXFOR	E2518.026
<input type="checkbox"/>	H.Wang et al.	2017	1.2e+08	Expt	Jour PTEP,2017,021D01,2017	EXFOR	E2518.025
<input type="checkbox"/>	H.Wang et al.	2017	1.2e+08	Expt	Jour PTEP,2017,021D01,2017	EXFOR	E2518.024
<input type="checkbox"/>	H.Wang et al.	2017	2.0e+08	Expt	Jour PTEP,2017,021D01,2017	EXFOR	E2518.017

図 3: ^{107}Pd の検索結果

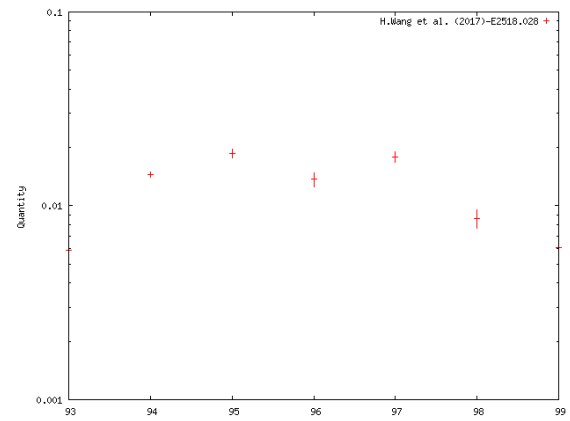


図 4: 検索結果から図示した断面積

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 ^{107}Pd [2] 及び論文準備中の ^{93}Zr [3]、それぞれの核データを、Frag Data という PHITS の機能を用いて取り入れ、シミュレーションを実施した。図 7 はシミュレーションによる Zr アイソトープの生成断面積を表わしている。もともとのデータは点線と丸で表しており (緑)、実線と丸は実験値である (赤)。破線と点で表された Frag Data を利用した結果 (青) が実験値を完全に再現している事が分かる。Frag Data の形式については PHITS 開発者と調整中である。

2.4 検索・利用システム開発・テスト

^{79}Se 、 ^{93}Zr 、 ^{107}Pd 、 ^{135}Cs に関する核データを検索・利用するシステムを、Web サイト上に試作した (図 8,9)。データベース管理システムとして MySQL を使用し、数値データをあらかじめ入力しておき、プログラミング言語 Perl を用いたスクリプトにより検索することが可能となっている。ま

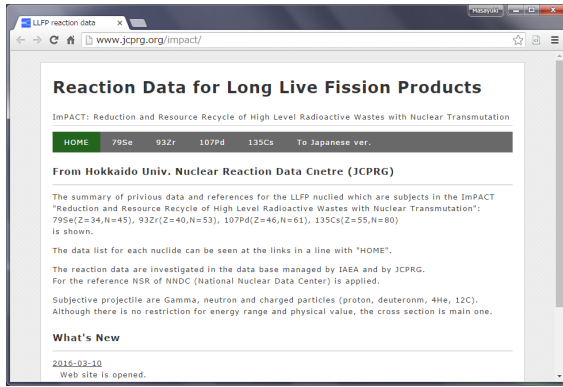


図 5: 過去のデータをまとめたサイト
(<http://www.jcprg.org/impact/>)

Reaction Data for Long Live Fission Products
IMPACT: Reduction and Resource Recycle of High Level Radioactive Wastes with Nuclear Transmutation

HOME 79Se 93Zr 107Pd 135Cs To Japanese ver.

From Hokkaido Univ. Nuclear Reaction Data Centre (JCPRG)

The summary of previous data and references for the LFP nuclides which are subjects in the IMPACT "Reduction and Resource Recycle of High Level Radioactive Wastes with Nuclear Transmutation": ^{79}Se ($Z=34, N=45$), ^{93}Zr ($Z=40, N=53$), ^{107}Pd ($Z=46, N=61$), ^{135}Cs ($Z=55, N=80$) is shown.

The data list for each nuclide can be seen at the links in a line with "HOME".

The reaction data are investigated in the data base managed by IAEA and by JCPRG. For the reference NSR of NNDC (National Nuclear Data Center) is applied.

Subjective projectile are Gamma, neutron and charged particles (proton, deuteron, ^4He , ^{12}C). Although there is no restriction for energy range and physical value, the cross section is main one.

What's New
2016-03-10
Web site is opened.

135Cs, Cesium 135 (Z=55, N=80)

Ground & Isomer states
They are taken from NNDC.

	E [MeV]	J π	T $_{1/2}$	Decay mode [%]
Ground	—	7/2+	2.3×10^6 year	β^- : 100
Isomer	0.249767(4)	5/2+	0.28 ns	γ : 100

Reaction Data Reference

Projectile	#	Reaction	Reference	Data ID#
Gamma	0(1)	$^{135}\text{Cs}(\gamma, \text{ABS})$	Thao: 3D-Skyrme Cs-TDFHR	135CsE.01
Neutron	10	$^{135}\text{Cs}(n, \gamma)^{136}\text{Cs}$	Rock: Atlas of Neutron Resonances 7066	V1002.081, V1002.082
			Phys. Rev. C89 (2004) 025802	22945.002

図 6: ^{135}Cs の反応に関する核データ一覧

た、グラフ描画プログラム Gnuplot を用いた作図システムも導入しており、今後は改良を加えると同時にバグを取り除く必要がある。

2.5 核データ取得手法の研究

相互作用断面積について提案した Thick-Target Transmission 法 (T3 法) [4] を使い、 ^{79}Se 、 ^{93}Zr 、 ^{107}Pd 、 ^{135}Cs を対象としたシミュレーションを行った。この手法は、相互作用断面積 σ_I を測定する透過法を拡張し、標的の厚さを変えつつ入射ビームの減衰量を繰り返し測定するというものである。ここでは一例として、T3 法を用いた ^{93}Zr の相互作用断面積測定のシミュレーション結果を図 10 に示す。このシミュレーションでは、入射エネルギーを 100MeV/nucleon、標的を ^{12}C とし、標的の厚さが 0.2cm 以下の場合には 0.02cm の箔を順次重ね、0.2cm 以上 0.24cm 以下では 0.004cm の箔を順次重ねた。それぞれの厚さでの入射粒子数を、毎秒 1,000 個、100 秒間と仮定した。この結果、同様の実験を行うことにより、図 10 のような相互作用断面積が得られることが分かった。

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、北海道大学は対象とする 4 核種 (^{79}Se 、 ^{93}Zr 、 ^{107}Pd 、 ^{135}Cs) の核反応データベースに関して次の 5 項目の研究開発を担当している。それぞれ、(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 シミュレーションへ実験データを導入する為の新形式の開発、(4) これ等データの検索・利用システム開発・テスト、そして、(5) より効率的な核反応データ取得手法の研究である。本稿では、これらの項目について 2016 年度の進捗を報告した。

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] H. Wang et al., “Spallation reaction study for the long-lived fission product ^{107}Pd ”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017 (2017) 021D01.
- [3] S. Kawase et al., Private communication.
- [4] M. Aikawa, S. Ebata, S. Imai, “Thick-target transmission method for excitation functions of interaction cross sections”, Nucl. Instr. Meth. B383 (2016) 156.
- [5] T. Sato, et al., “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52”, J. Nucl. Sci. Technol. 50 (2013) 913.

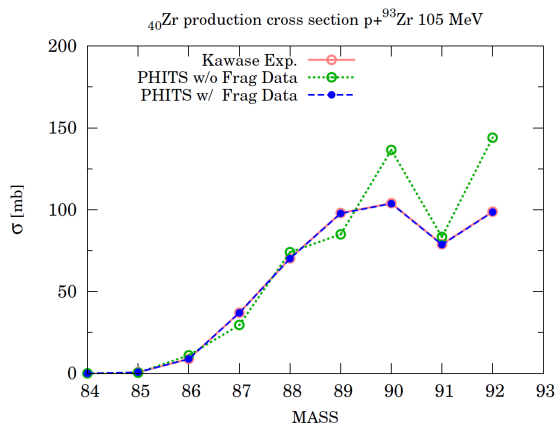


図 7: Frag Data を用いた ^{93}Zr 標的への陽子入射反応のシミュレーション結果

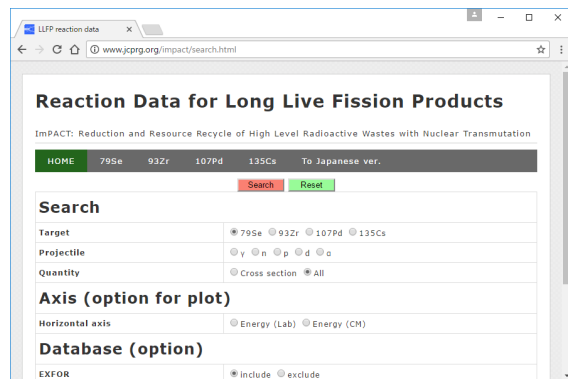


図 8: 検索サイト (<http://www.jcprg.org/impact/search.html>)

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,C)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,C)46-PD-108,,SIG,,AV (Cross section- average)						
4	R.L.Macklin	1985	3.0e+03 6.0e+05	Expt Jour	NSE,89,79,1985	EXFOR 12874.003
46-PD-107(N,C)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,C)46-PD-108,,RI (Resonance Integral)						

図 9: 検索結果

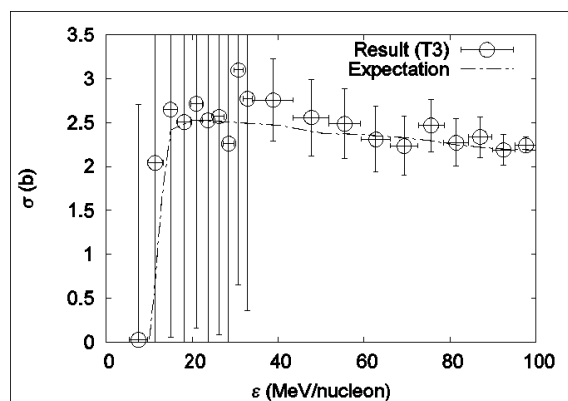


図 10: ^{12}C 標的に対する ^{93}Zr 入射の相互作用断面積。試行回数が少ないため統計誤差が大きい。