

## SICORP EU final summary

**Project title : Exploring the potential of Iron-based Superconductors (SUPER-IRON)**

**Coordinator of the EU part of the project : Prof. Marina Putti (CNR-SPIN, Italy)**

**Coordinator of the Japanese part of the project : Prof. Jun-ichi Shimoyama (Univ. of Tokyo, Japan)**

**Project period : Oct. 1, 2011 – March 31, 2015**

### **Consolidated public summary in English**

**SUPER-IRON: exploring the potential of Iron-based superconductors**

#### **General Objectives:**

**Novel, unconventional, high  $T_c$ , Iron-based superconductors: are they high-performance and tame materials suitable for high field applications?**

Iron-based superconductors (FeBS) discovered in 2008 in Japan by the group of Prof. Hosono, are the newest entry among the superconducting materials, with the second record critical temperature  $T_c$ , after the high- $T_c$  cuprate superconductors (HTS). FeBSs share several characteristics with HTSs, such as the layered structure, the occurrence of superconductivity upon doping, the small coherence length, and the nonconventional pairing. Some of these aspects have proved to be unsuitable for practical application. However, FeBSs exhibit several advantages with respect to HTSs; namely, they are more metallic, and anisotropy is generally smaller.

Moreover, FeBSs are extremely versatile in terms of chemical composition, and their layered structure allows designing new FeBS with composite structures or even artificial multilayers that could allow tailoring the superconducting properties for commercial technologies.

In SUPER-IRON we depict the roadmap for exploring and exploiting the potentialities of FeBSs, pursuing the following objectives:

1. Developing preparation methods of single crystals, thin films, polycrystals and wires.
2. Tuning the superconducting properties
3. Investigating the nature of grain boundaries.
4. Qualifying the potential of FeBSs for high field applications.

Objective 1 requires vast experience and suitable facilities for material preparation in form of single crystals, polycrystals, thin films, and advanced characterization, including structural,

magnetic, thermal and electrical, and also local probe of superconducting properties by visualization of local electric field.

Objective 2 is devoted to improvement of superconducting properties, such as  $T_{c1}$ , the upper critical field, the critical current anisotropy and includes the discovery of new FeBS families.

Objective 3 deals with the crucial issue of grain boundaries in polycrystalline materials that strongly affect the capability of carry current of technical conductors as wires and tapes. It relies on the development of advanced techniques for the material preparation, characterization and modelling of well controlled GBs, and on the realization of tapes and wires as well.

Objective 4 requires updating the results obtained on FeBSs and comparing them with data relevant to superconductors with a high application potential, with the aim of assessing the capability of FeBSs to turn into industrial products in the long term.

Main results achieved within the SUPER-IRON consortium:

- Several new FeBS materials have been discovered with remarkable superconducting properties. These discoveries may be functional for deciphering the nature of superconductivity in FeBS;
- FeBS films and single crystals with outstanding properties ( $T_{c1}$ , upper critical field and critical current) have been grown. These results prove that FeBS are positively affected by doping, defects and lattice strain and suggest that their performance can be further improved;
- New synthesis methods of the main FeBS families have been developed. The production of pure and well connected polycrystalline materials is the first step for the implementation of technical conductors like wires and tapes;
- The capability of technical samples (wires and coated conductors) to carry current has been largely improved, and our ultimate target performance ( $J_{c1}=10^5 \text{ Acm}^{-2}$  @5 T) has been achieved. This definitely demonstrates the high potentiality of FeBS for high field applications;
- Two successful workshops (one in Europe, one in Japan) have been organized by students for students. These events contributed to the networking of young researchers that are moving between laboratories, giving long lasting ground to the EU-Japan collaboration.

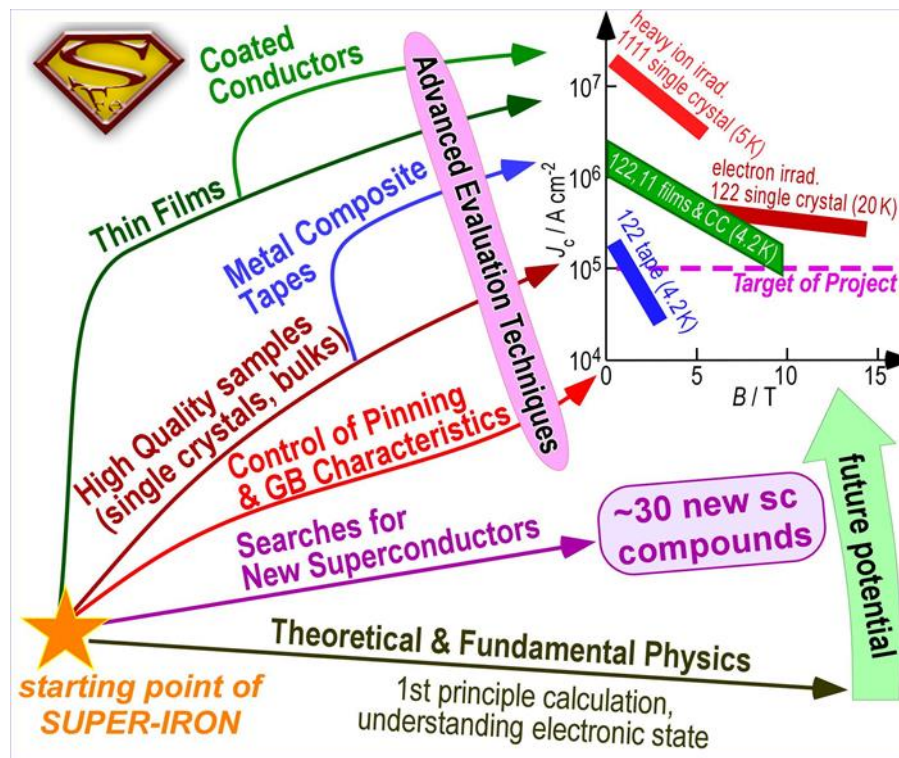
One major objective of SUPER-IRON was to strengthen the European-Japanese cooperation aware that challenging results can be expected only by integrating and coordinating research activities. The Japanese and European groups all extremely strong in the superconductivity field, have shared knowledge and available tools, advanced and interdisciplinary competences for the achievement of the outstanding results listed above.

Steady information flow, exchange and training of researchers, organization of common scientific events and of two student workshops have also been pivotal.

The results of SUPER-IRON have been presented at several international conferences. Around 300 contributions (invited, oral and poster) have been presented, 27 from EU-Japanese collaboration. Prof. J. Shimoyama has given a plenary talk on the state of the art of FeBS to the European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS) 2013, and Prof. M. Putti has been invited to present the results of SUPER-IRON project at MRS 2013.

119 papers have been published on international journals by the partners, 4 of which are EU-Japanese joint papers, several others are under preparation.

A website has been implemented for the project dissemination (<http://www.super-iron.eu/>).



The SUPER-IRON project is a fundamental research project coordinated by Consiglio Nazionale delle Ricerche (Italy) (CNR) in EU, and by the University of Tokyo (UT) in Japan. As to the European partners besides CNR, it associate the Atominstitut of the Vienna University of Technology (TUW) (Austria), the Institut für Festkörper und Werkstofforschung in Dresden (IFW) and the Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in München (Germany), and Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (Switzerland), whereas in addition to the University of Tokyo, the Japanese consortium is constituted by the University of Kyushu (KU), as well as the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and National Institute for Materials Science (NIMS).

The project started on October 1<sup>st</sup>, 2011 and lasted 42 months. EU grant amounted to €1.725.659 and JST grant amounted to ¥142,000,000

## CONSOLIDATED PUBLIC SUMMARY IN JAPANESE

### SUPER-IRON: 鉄系超伝導体における材料ポテンシャルの開拓

研究目的：

- 1) 新しい従来にない機構の鉄系高温超伝導体について、通電応用に対する十分な特性を持ち実用的な材料に育つポテンシャルの有無を見極める。
- 2) 我々が扱える数種の鉄系超伝導体の系について、高温超伝導の起源の解明および高性能かつ実用材料開発を実施する。

2008年に日本の細野教授のグループによって版權された鉄系超伝導体は、最も新しい超伝導体群であり銅酸化物超伝導体に次ぐ高い $T_c$ を示すことが特徴である。鉄系超伝導体は銅酸化物超伝導体とのいくつかの共通点、層状構造、ドーピングによって発現する超伝導、短いコヒーレンス長、特異な対称性、を持ち、そのなかには実用には好ましくないものも含まれるが、より金属的であり異方性が小さいといった銅酸化物超伝導体より優れている点がある。さらに鉄系超伝導体では化学組成が柔軟に変えられることから、新しい構造を持つ超伝導体の設計・探索や、実用材料化に適した超伝導特性の実現に向けての人工的な多層構造の創成にも生かせる。

本 SUPER-IRON プロジェクトでは、以下の研究課題の実施により鉄系超伝導体のポテンシャルの解明と開拓を進めた。

1. 単結晶、薄膜、多結晶、線材の作製方法の最適化
2. 超伝導特性の制御
3. 結晶粒界特性の解明
4. 鉄系超伝導体のポテンシャルの評価

課題 1 では、単結晶、薄膜、多結晶作製の多くの実績と適切な装置が、さらに構造解析や磁氣的、熱的、電氣的性質、および電場の可視化などによる局所的な超伝導特性の先進技術による評価が必要である。課題 2 は  $T_c$ 、上部臨界磁場、臨界電流特性の異方性など超伝導特性の改善を目指すもので、あり新超伝導体による高特性の実現も目指すものである。課題 3 は線材やテープ材料の通電容量に直接影響する多結晶材料の粒界特性向上を目指すもので、材料作製や評価技術の開発、制御された粒界特性のモデル化、およびその成果の線材、テープへの適用を行う。課題 4 では鉄系超伝導体の特性の向上を進めつつ、他の実用超伝導体の性能と比較し、将来的に鉄系超伝導材料が工業製品に至る資質を有するか否かを評価する。

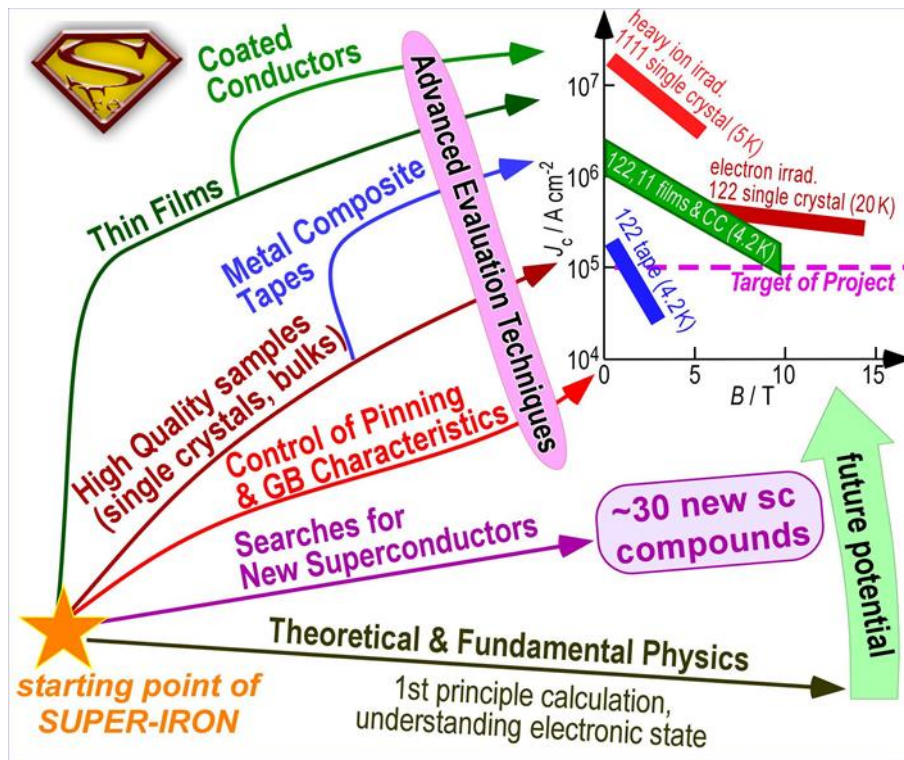
本プロジェクトの主な成果は以下の通りである。

- ・優れた超伝導特性を示す多くの新超伝導体を発見した。これらは鉄系超伝導体の性質をより明らかにする上でも重要な発見である。

- ・非常に優れた特性 ( $T_c$ 、上部臨界磁場、臨界電流密度) を有する高い鉄系超伝導体の薄膜、単結晶の作製に成功した。これらの研究より鉄系超伝導体の特性がドーピングや欠陥、格子歪みの導入によってさらに改善可能であることが示唆された。
- ・高純度で粒間結合に優れる鉄系超伝導体の多結晶試料の作製方法を開発した。これは高特性の線材、テープ開発につながる成果である。
- ・線材や薄膜線材 (coated conductor) の臨界電流特性が大幅に上昇し、目標特性である  $J_c = 10^5 \text{ Acm}^{-2}$  @ 5 T が達成された。これは鉄系超伝導体の通電応用へのポテンシャルを明確に示した結果である。
- ・学生の企画・運営により、学生のためのワークショップを 2 回 (EU、日本各 1 回) 開催した。この企画を通じて、若手研究者のネットワークが構築され、今後の EU と日本の共同研究の基盤づくりの機会となった。

SUPER-IRON の大きな目的の一つは日欧共同研究の強化であり、大きな成果の獲得には各グループの研究活動の融合、協調が必要であることを意識してプロジェクトを遂行した。日欧の構成グループは全て超伝導分野ではかなりの実績があったが、本プロジェクトにおいて知識や装置、さらに先進的かつ学際的な活力を共有することによって、上記の成果を挙げることができた。確固とした成果の紹介だけでなく研究者の交流と育成、学会の企画・運営、学生ワークショップの実施なども重要な成果といえる。

SUPER-IRON プロジェクトの成果は多くの国際会議で報告している。発表総数は約 300 件であり、うち 27 件が日欧の共同研究成果である。MRS2013 では Putti 氏が本プロジェクトの成果を紹介する招待講演を、EUCAS2013 では下山が鉄系超伝導体のポテンシャルを議論する基調講演を行った。学術誌には 119 報の論文が掲載され、うち 4 報が日欧共同研究の成果で、さらに数報の論文の掲載準備を進めている。また本プロジェクト活動についてはウェブサイト (<http://www.super-iron.eu/>) でも紹介している。



SUPER-IRON は、EU 側の Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR : イタリア) と日本側の東大グループが中心となって運営した基盤研究プロジェクトである。CNR のほかの欧州の研究グループは Atominstitut of the Vienna University of Technology (TUW : オーストリア), the Institut für Festkörper und Werkstofforschung in Dresden (IFW : ドイツ), the Ludwig-Maximilians-Universität (LMU : ドイツ) と Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL : スイス) (Switzerland)であり、一方、日本側は東大グループのほか九大、産総研、物材機構のグループで構成した。本プロジェクトは2011年の10月1日に始まったもので研究期間は3年半に及んだ。EU および JST からの助成額はそれぞれ 1,725,659 ユーロと 142,000,000 円であった。