

Závěrečná zpráva řešení projektu 1581/2009/A/a

Metodické centrum termojaderné fúze

V Praze dne 20.1.2010

**prof. Ing. Igor Jex, DrSc.
hlavní řešitel projektu
ing. Vojtěch Svoboda, Csc.
RNDr. David Břeň, Ph.D.
spoluřešitelé**

Cíle řešení

Cílem projektu bylo zprovoznění tokamaku CASTOR, dříve umístěném v Ústavu fyziky plazmatu, na půdě FJFI ČVUT pro účely výuky studentů v oblasti fyziky plazmatu s akcentem na termojadernou fúzi. Praktická výuka na tomto jedinečném zařízení je určena pro studenty všech VŠ kvalifikačních stupňů, tj. bakalářských, magisterských i postgraduálních jak domácích, tak i zahraničních.

Druhým cílem projektu bylo sestavení základní nabídky experimentů prováděných na tomto zařízení. Experimenty jsou směřovány převážně na výuku diagnostiky základních vlastností jevů a chování plazmatu očekávaných na zařízeních světových fúzních center. Projekt doplňuje investice, které realizuje FJFI pro zprovoznění tohoto zařízení (úprava prostor, nutná infrastruktura, stěhování zařízení atp.)

Postup a způsob řešení

V průběhu první poloviny roku byly sestaveny jednotlivé komponenty technologického řešení tokamaku:

- Vakuové čerpání.
- Energetika.
- Řídicí systém.
- Základní diagnostika.

V červenci 2009 byly úspěšně provedeny první integrální testy a díky intenzivnímu úsilí se podařilo uskutečnit první zapálení plazmatu a začít s provozováním tokamaku. Na grafickém výstupu (viz obr. 1 „Tokamak - výboj“) diagnostických prvků můžeme vidět výsledek jednoho z prvních zapálení plazmatu. Zelené křivky popisují sledované veličiny v případě, že v komoře není vodík a ke vzniku plazmatu tak dojít nemůže. Červené pak v situaci, kdy je do komory vpuštěn plynný vodík a dojde během výboje ke vzniku plazmatu. Z rozdílu v křivkách je vidět, že došlo k zapálení plazmatu v čase 6 ms a plazma existovalo po dobu 4 ms. Svědčí o tom náhlý pokles napětí na závit U_{loop} a signál z fotočlánku v posledním grafu. Fotočlánek monitoruje záření plazmatu ve viditelné oblasti spektra. Signál B_t představuje průběh vnějšího magnetického pole sloužícího k udržení plazmatu v komoře a signál I_{p+ch} monitoruje proud komorou a plazmatem (v grafu lze rozeznat složku proudu plazmatem v čase od 6. do 10. ms, která je superponována k proudu komorou – ten má trvale sestupnou tendenci). Čtyři milisekundy trvající zážeh plazmatu je relativně krátký. V dobách své největší slávy pod jménem CASTOR produkoval tokamak zážehy trvající až čtyřicet milisekund. Ovšem Golem je teprve na začátku a řada podpůrných zařízení ještě není instalována. I s pomocí studentů se budou jeho parametry v budoucnu zlepšovat.

Řízení tokamaku GOLEM je navrženo tak, aby bylo možné řídit jej „na dálku“ technologií Remote handling. Takto je možné, aby toto zařízení operovali studenti ze zahraničí přes webovské rozhraní (viz obr.2 a 3 WWW rozhraní a Web Control Room) aniž by museli být fyzicky přítomni přímo u experimentu. Takto bylo prozatím realizováno již několik vzdálených měření:

- září 2009: Innsbruck, Rakousko.
- září 2009: Kudowa Zdroj, Polsko.
- říjen 2009: Nancy, Francie.
- říjen 2009: Budapest, Maďarsko.
- prosinec 2009: Ghent, Belgie.
- leden 2010: Kostarika.

Tokamak Golem ihned po svém zprovoznění začal sloužit svému primárnímu účelu a v září 2009 na něm bylo měřeno v rámci mezinárodní letní školy fyziky plazmatu, tzv. SUMTRAIC a v lednu 2010 se na něm uskutečnilo vzdálené měření v rámci zimní školy fyziky plazmatu studijního zaměření „Fyzika a technika termojaderné fúze“. Dále jsou na tomto zařízení již vychováváni studenti v rámci svých bakalářských prací (1 student přímo a 2 nepřímo) a činnost tokamaku byla již mnohokrát demonstrována na různých exkurzích pro studenty středních škol a zájemce z řad odborné veřejnosti. Na tokamaku v současnosti běží i seznámení s moderními budoucími trendy získávání energie v rámci celoživotního vzdělávání, jmenovitě seniorů kursu „Fyzika přátelsky“ na FJFI ČVUT.

Podrobnosti realizovaných akcí a vůbec celkové informace o tokamaku GOLEM jsou k nalezení na www stránkách <http://golem.fjfi.cvut.cz>.

Vakuové komponenty

Pro činnost tokamaku je nezbytné vyčerpát komoru na hodnoty vysokého vakua a měřit dosažený tlak. Na obr. 4 „Tokamak Golem“ lze vidět instalované prvky pořízené z prostředků grantu, jako turbomolekulární vývěva, měřka vakua a napouštěcí ventil pro pracovní plyn. Na obr. 5 „Komora“ lze vidět vývoj tlaku při čerpání tokamaku jednak v celkovém pohledu, jednak v detailu a následně časový průběh komory při indukčním ohřevu tak, jak to bylo použito při vzdáleném měření v lednu 2010 z Budapešťské technické univerzity v Maďarsku.

Základní diagnostiky:

K provozu tokamaku je nutná sada standardních diagnostik měřících globální parametry výboje (hustota plazmatu, elektronová a iontová teplota, napětí na závit, proud plazmatem a vyzařování na jednotlivých vybraných energiích Halfa, CIII, atp.). V rámci projektu byly realizovány čtyři základní diagnostiky (viz popis níže), které jsou nezbytné k "nalezení" kvalitního výboje (viz obr. 6: DAS a obr. 1: Tokamak - Výboj).

Diagnostika horkého plazmatu na Z-pinčové aparatuře

Pořízené přístroje slouží k seznámení se základními poznatky z teorie neutronové detekce jako jsou např. základy teorie D-D reakce, určení podélné složky energie deuteronu z energie neutronu, princip detekce neutronů scintilačními detektory, základy metody TOF a stanovení chyby v určení energie.

Analýzou signálů z výstřelů 6540, 8406 a 8411 ze Z-pinče byly například tabulkové a grafické výstupy, ze kterých byly vyvozeny následující závěry (viz obr. „Měření Z-pinch“):

Úvaha časových rozdílů mezi různými místy v neutronovém a rentgenovém píku časového spektra pomocí metody TOF umožňuje kvantitativně odhadnout energie neutronů vlétajících do detektoru. Významné jsou pro nás přitom energie 1-1, resp. 2-2, resp. 1-3, resp. 1-4, kterými odhadujeme energii většiny neutronů, resp. nejmenší hodnotu maximální energie neutronů, resp. maximální, resp. minimální hodnotu neutronové energie.

Stanovením rozlišovací schopnosti u výstřelů s blízkými a dalekými detektory bylo potvrzeno, že přesné určení energetického spektra metodou TOF je možné pouze u dalekých detektorů. Chyba v energii stanovená dalekým detektorem byla o řád menší než u blízkého detektoru.

Pro výstřel s dalekými detektory, u něhož je stanovení energií nejpřesnější, jsme odhadli energii slučujících se deuteronů hodnotou 100 keV.

Dozimetrie polí ionizujícího záření v blízkosti tokamaku a RTG diagnostika

Na řešeném projektu se katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření (KDAIZ) podílela monitorováním ionizujícího záření X a gama. Přístrojové vybavení na KDAIZ umožňuje dozimetrii i spektrometrii fotonového záření s energií od několika keV do několika MeV. Ke spektrometrii záření X v oblasti od 1 keV do několika desítek keV lze použít miniaturní polovodičové detektory typu Si-PiN. K identifikaci možných zdrojů záření gama v oblasti energií od přibližně 100 keV do 3 MeV slouží spektrometrický HPGe detektor s 5 litrovou Dewarovou nádobou na kapalný dusík. K měření ekvivalentních dávek v této oblasti energií jsou určeny osobní dozimetry Mini-Radiac firmy Canberra. Tyto dozimetry umožňují poměrně přesné stanovení dávek a dávkových příkonů už na úrovni přírodního pozadí, avšak nejsou citlivé na záření X nízkých energií. Proto bylo nutné pořídit nový dozimetr, který by dovoľoval stanovení dávek i od fotonů s energií od několika keV.

Z přidělených prostředků byl dle požadavku pořízen měřicí přístroj X-Ray/Gamma-Dosimeter typ RGD 27091 od firmy STEP Sorsortechnik und Elektronik Pockau GmbH. Pořizovací cena tohoto zařízení činila 203 252 Kč včetně DPH.

Přístroj X-Ray/Gamma-Dosimeter typ RGD 27091 umožňuje stanovení fotonového dávkového ekvivalentu, konkrétně operačních veličin prostorového dávkového ekvivalentu a příkonu prostorového dávkového ekvivalentu. Základem tohoto dozimetru je vzduch-ekvivalentní ionizační komora s citlivým objemem o velikosti 600 cm^3 . Rozsah měřitelných energií fotonového záření je velmi široký. Dozimetrem mohou být zaregistrovány jak fotony záření X s nízkou energií, tak i záření gama s energií až do 7 MeV. Při měření fotonů nízkým energií lze zařízení přizpůsobit ke stanovení fotonového dávkového ekvivalentu pro fotony od energií 6 keV. Navíc přístroj vykazuje malou energetickou a směrovou závislost.

Uplatněním měřicího přístroje RGD 27091 je nejen monitorování radiační zátěže v blízkosti tokamaku, ale také může posloužit studentům při laboratorních úlohách zaměřených na dozimetrii ionizujícího záření.

Systém pro měření magnetického pole a zpětnovazební řízení polohy plazmatického sloupce

Na tokamaku byla s pomocí studenta bakalářského studia již provedeny první magnetická měření, která slouží pro zjišťování časového vývoje polohy plazmatu. Obr. 8: „Magnetická měření zesilovač“ a obr. 9: „Magnetická měření“ dokumentují pořízený přístroj a první výsledky měření, kde na spodním grafu lze pozorovat časový vývoj polohy plazmatu, který putuje přes osu toroidálního systému. Tento signál bude použit jako vstup do výkonového zesilovače (viz obr. 10 „Zpětnovazební řízení polohy“), který bude pouštět proud do kvadrupólového systému cívek a takto vytvořeným magnetickým polem stabilizovat požadovaným způsobem plazma v centru komory. Tímto by se měl dosáhnout stabilnější a déle trvající výboj.

Interferometr ve 4mm pásmu (s frekvencí 75GHz)

Možnost bezkontaktního měření hustoty nabitých částic je jeden z hlavních požadavků na diagnostiku horkého plazmatu ve všech tokamacích. Jako generátor sondující vlny je pořízena Gunnova dioda s rychlým ($f_{IF} = 500 \text{ kHz}$) frekvenčním rozmítáním, umožňujícím sledovat časové změny hustoty plazmatu na mezifrekvenci f_{IF} , tedy s dostatečným časovým rozlišením blížícím se 10 mikrosekund s výkonem generátoru minimálně 100mW (viz obr. 11 „Mikrovlny - generátor“). Ostatní komponenty jsou použity z minulého vybavení předchůdce tokamaku GOLEM – tokamaku CASTOR.

Pole bolometrů pro měření radiačních ztrát

Na tokamaku GOLEM se budou používat dvě pole bolometrů, které se budou na plazma dívat v horizontálním a vertikálním směru. Jedno pole se v současné době již instaluje do tokamaku a pro druhé pole se vyrábí příruba, která se z minulého působení již nedala použít. Pole bolometrů byla podrobena kalibraci a zároveň se dokončuje systém sběru dat a softwarového zpracování.

Data Acquisition Systém

Ve finálním stádiu výroby jsou nyní systémy sběru dat v počtu 48 kanálů s frekvencí 1 MHz s galvanickým oddělením a napojením na ethernet. Tyto sběry dat budou použity pro magnetická měření, základní diagnostiky, Langmuirovy sondy a pole bolometrů. Výhledově by se mělo pořídit dalších 36 kanálů pro potřeby dalších diagnostik a 10 velmi rychlých kanálů pro měření nestabilit v okrajovém sloupci plazmatu.

Specifikace některých zařízení pořizovaných z grantu, jmenovitě systém sběru dat, mikrovlnná diagnostika, zesilovače pro Langmuirovy sondy musela čekat na parametry výboje, které byly známy až začátkem září 2009. Proto návrh, realizace a koupě těchto zařízení musela nezbytně počkat a v době psaní závěrečné zprávy tohoto grantu byly práce u jednotlivých dodavatelů ve finálním stádiu.

Finanční čerpání

V průběhu řešení projektu nedošlo ke změnám skladby nakoupených investičních celků. Změny ve výši jednotlivých nákupů jsou způsobeny změnami kurzu a aktuální cenou na trhu, za kterou byly nakupovány.

Katedra fyziky navýšila v průběhu řešení svůj příspěvek v oblasti investičních výdajů z plánovaných 186 tis. Kč na 240 tis. Kč. V oblasti neinvestičních výdajů dotuje projekt další částkou v řádu 150 tis. Kč (datový sběr).

Realizované komponenty	plán	skutečnost
Osciloskop TDS3054C	231	231
Zpětnovazební řízení polohy	89	107.9
RTG diagnostika	203	203.2
Funkční generátor AFG3022B	79	78.8
Řídicí panel.	185	160.5
Magnetická měření	107	90.5
Turbomolekulární vývěva s příslušenstvím a měrkou	348	449
DAS, AD převodníky	440	403
Mikrovlny	78	89.9
Zesilovač pro Langmuirovy sondy	82	81.1
Bolometrie	44	44
Celkem	1886	1940

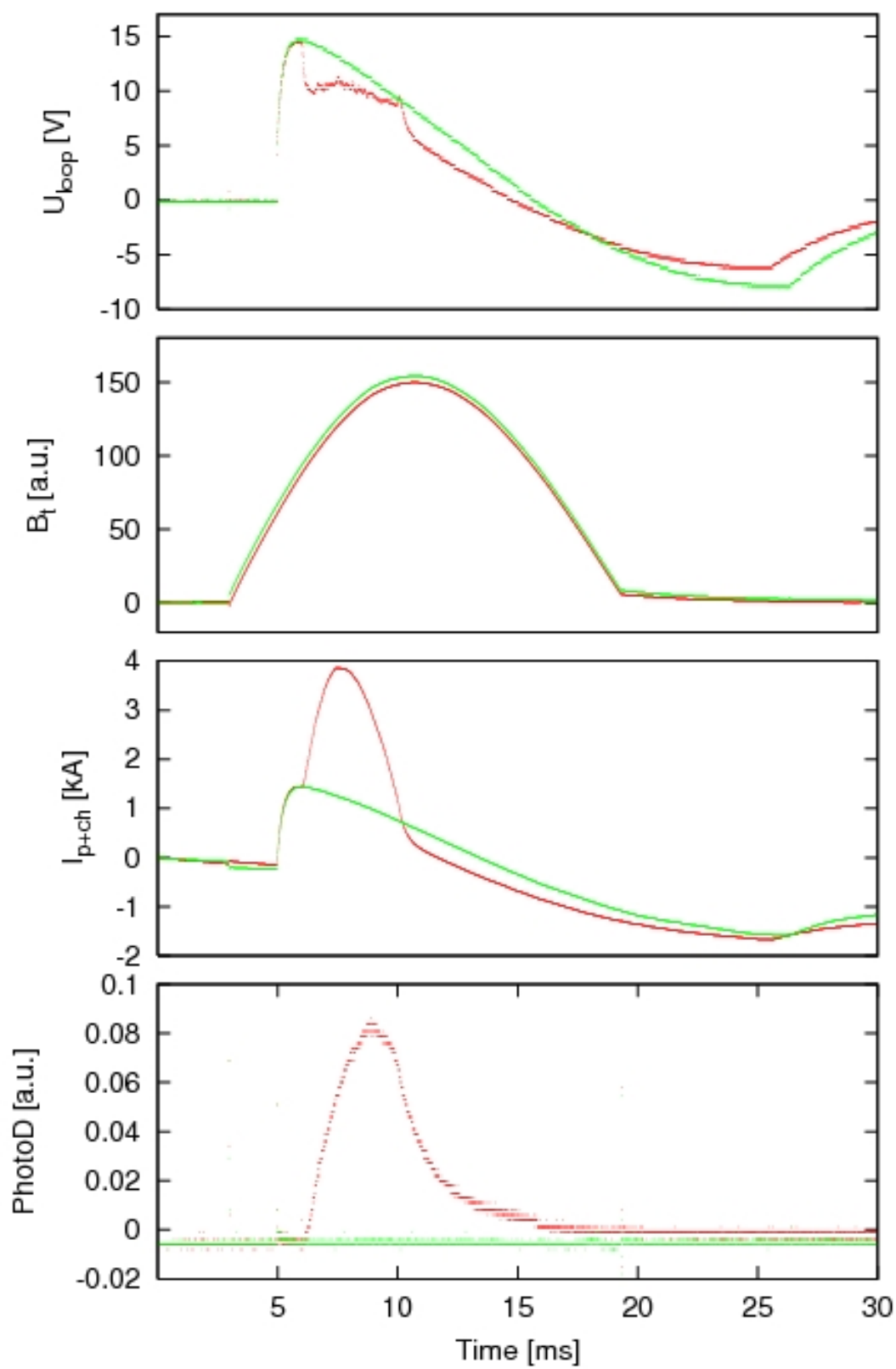
Dosažené výsledky a závěr

Projekt Metodické centrum termojaderné fúze byl a je úspěšně realizován. Výsledkem je unikátní funkční laboratoř, sloužící k praktické výuce v oblasti fyziky plazmatu a termojaderné fúze. **Závěrem lze konstatovat, že FJFI ČVUT v Praze se stala s podporou tohoto grantu jednou z velmi mála fakult na světě, ve kterých mají studenti přístup k tak excelentním zařízením jako je reaktor a tokamak.** Spuštění tokamaku Golem se proto stalo důvodem pro jeho slavnostní inauguraci, která proběhla druhé zářijové pondělí 2009. Zúčastnili se ji představitelé ČVUT, samotné FJFI i Ústavu fyziky plazmatu AVČR, pochopitelně i studenti. Setkali se tak ti, kteří tokamak využívali, i ti, kteří jej využít budou. A byla to také příležitost poděkovat všem, kteří se na úspěšném přestěhování podíleli.

Reference

- [1] Svoboda J., Mlynář J., Stöckel J., Jex I.: *Vzdělávání v oblasti termojaderné fúze v ČR, Čs.* čas. fyz. **59** (2009)
- [2] Jex I., Svoboda V., Mlynář J.: *Něžný dotek Slunce*, Pražská technika 4/2009
- [3] Wágner V.: *Po čtyřech stoletích obživil na Starém městě Golem*, URL: <http://osel.cz/index.php?clanek=4629> 20.09.2009

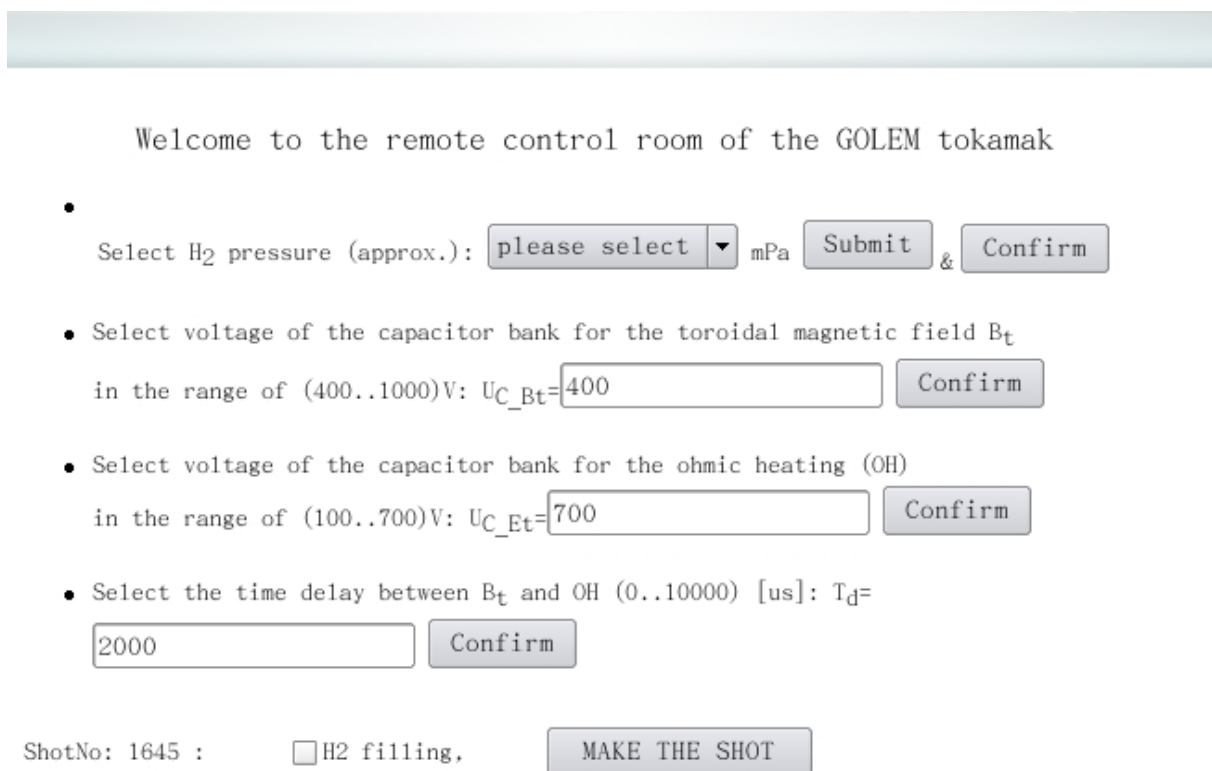
Obr. 1: Tokamak – výboj



Obr. 2: WWW rozhraní



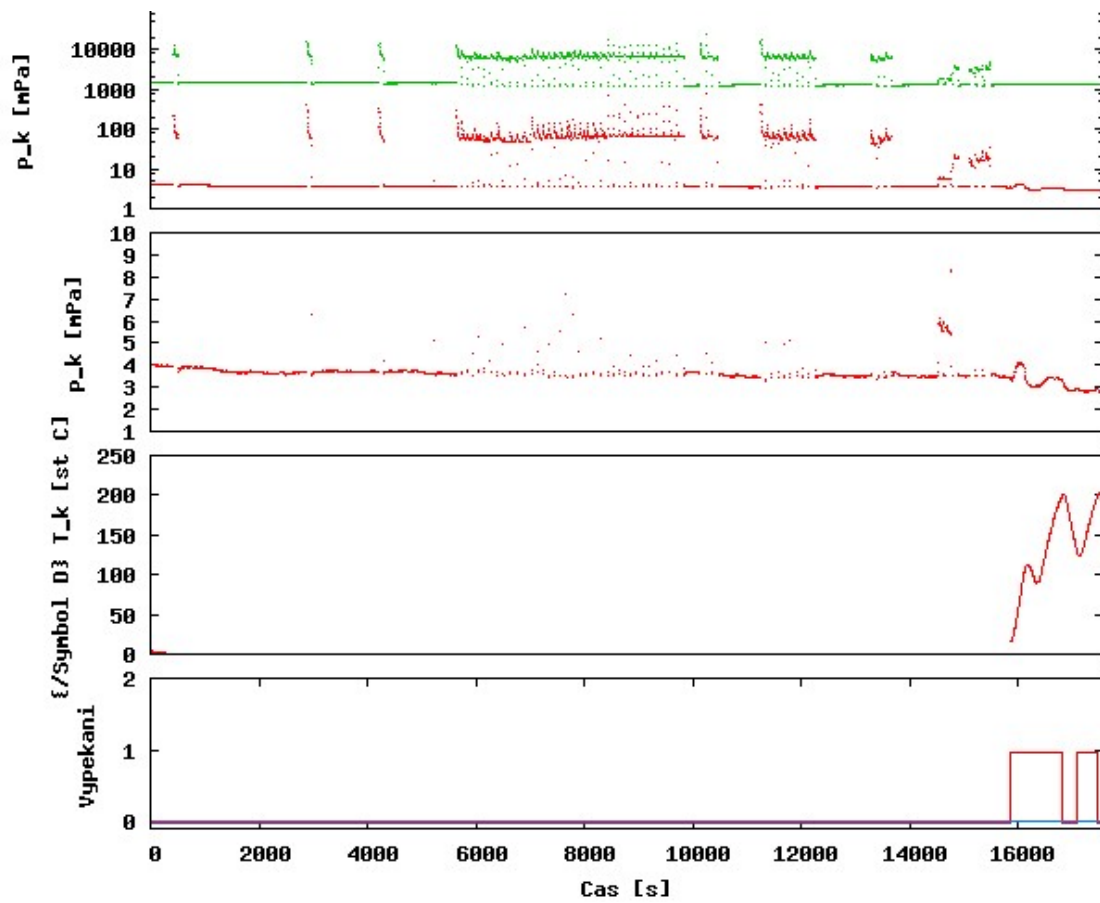
Obr. 3: Web kontrol room



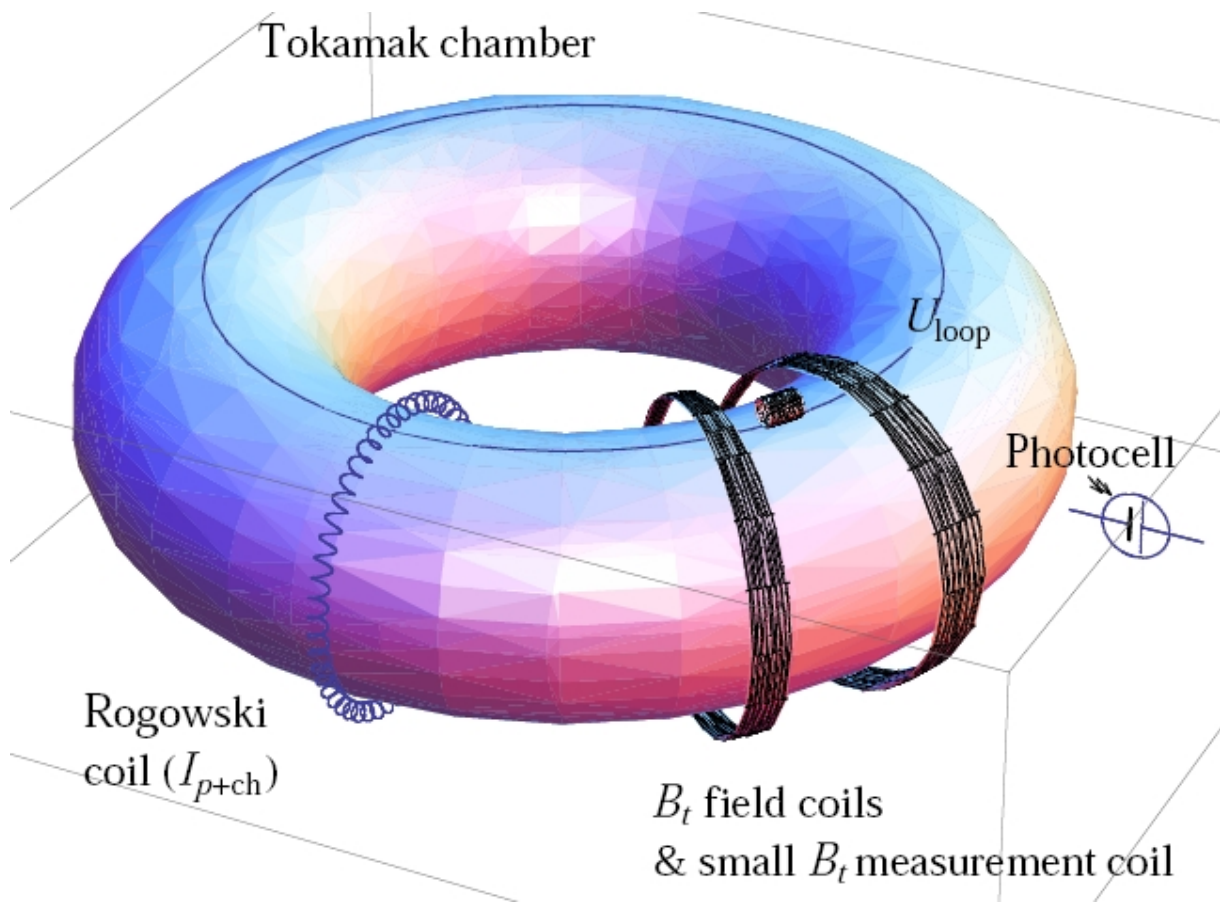
Obr. 4: Tokamak Golem



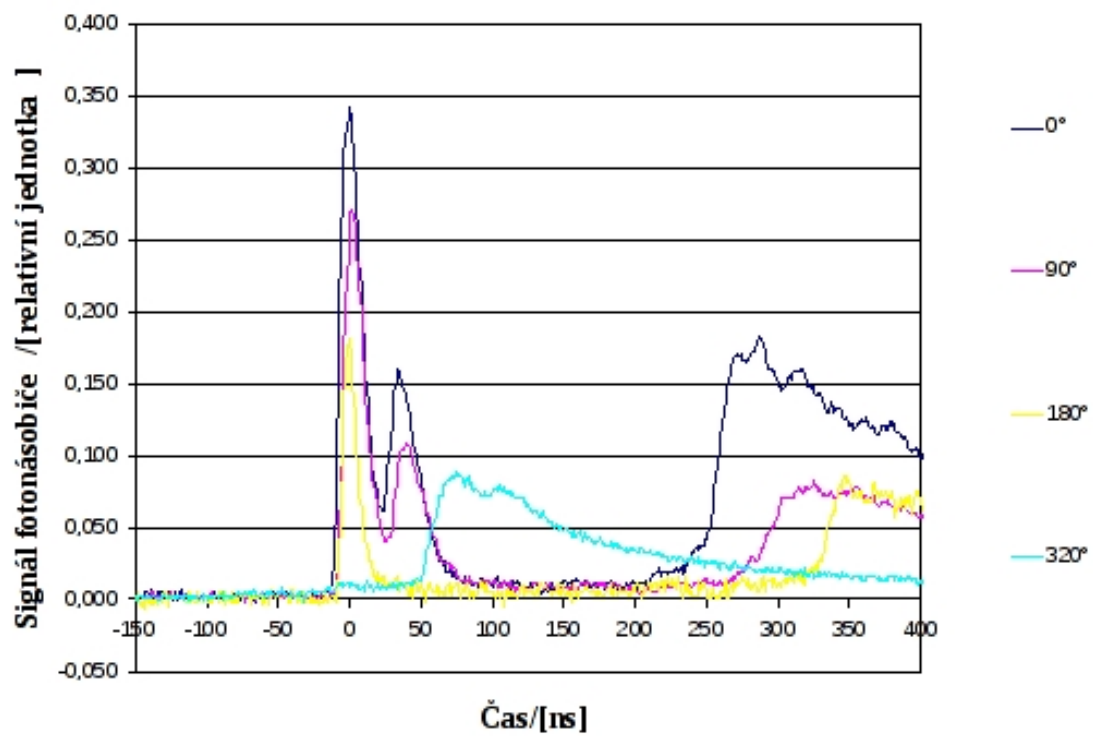
Obr. 5: Komora



Obr. 6: DAS



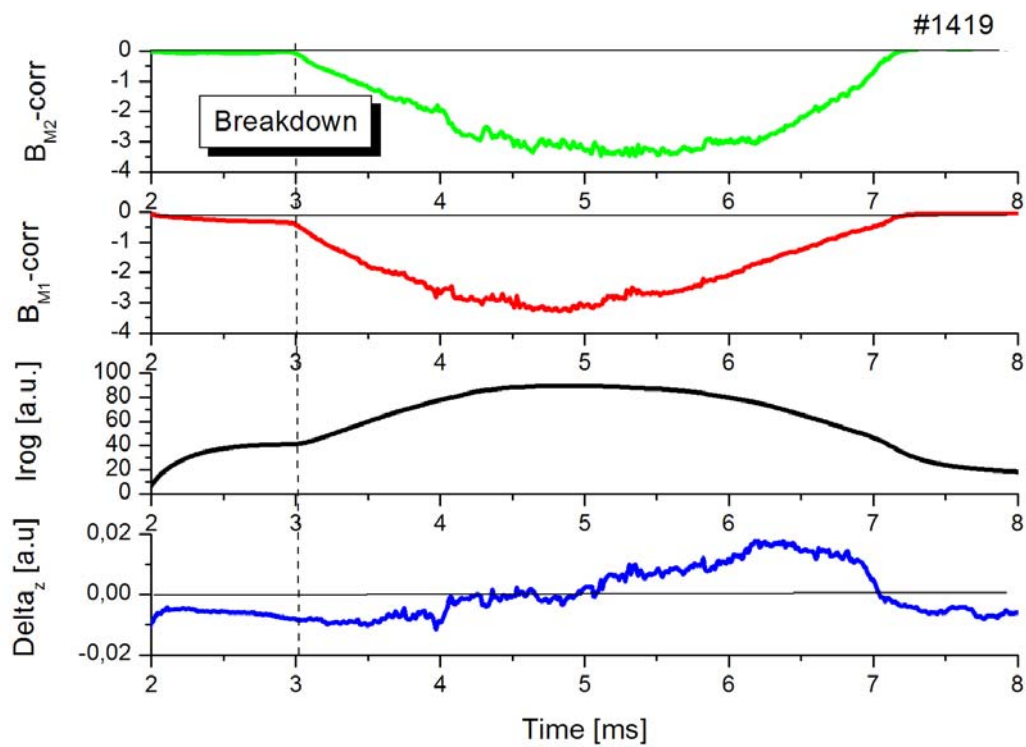
Obr. 7: Měření Z-pinch



Obr. 8: Magnetická měření zesilovač



Obr. 9: Magnetická měření



Obr. 10: Zpětnovazební řízení polohy



Obr. 11: Mikrovlny – generátor



Obr. 12: Rentgenová diagnostika

